32.336
Б-74

П. П. БОГОРОДИЦКИЙ и И. Д. ФРИДБЕРГ

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО „СОВЕТСКОЕ РАДИО"
МОСКВА 1948

36033

36033

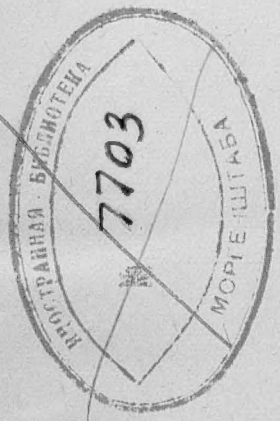
О-47
Б-74

Н. П. БОГОРОДИЦКИЙ
ПРОФЕССОР
ДОКТОР ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК
И
И. Д. ФРИДБЕРГ

Проверено | 2015

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

36033



Проверено
Фундаментальная
Военно-морская
библиотека ГШ ВМФ

ИЗДАТЕЛЬСТВО „СОВЕТСКОЕ РАДИО"
МОСКВА 1948

621.396 + 621.3.
B-74

ПРЕДИСЛОВИЕ

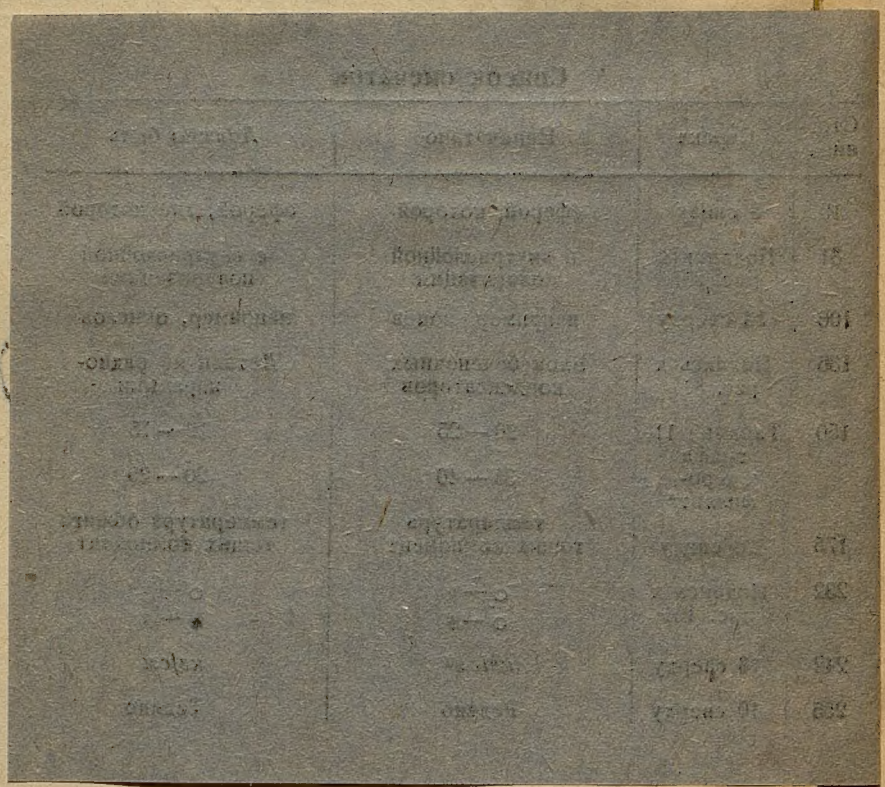
Настоящая книга явилась в результате наших изысканий в области высокочастотной изоляции, выполненных главным образом в последние годы.

Список опечаток

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
19	8 снизу	сферой, которой	сферой, вне которой
31	Подпись к рис. 20	и внутрислойной поляризации	с внутрислойной поляризацией
106	14 сверху	например, ионов	например, окислов
136	Подпись к рис. 87	Блок боченочных конденсаторов	Детали из радиокерамики
150	Таблица 11, графа „пирофиллит"	20 — 25 35 — 40	12 — 15 20 — 25
175	20 снизу	температура тощих компонент	температура обжига тощих компонент
232	Подпись к рис. 161	$\circ - \rho$ $\circ - \rho$	$\circ - \rho$ $\bullet - \rho$
242	18 сверху	*кв/см²*	*кв/см*
255	10 сверху	Редино	Тедино

уточнений. Но потребность в обзоре современных достижений в области высокочастотных неорганических диэлектриков велика и неотложна, и нам хотелось бы надеяться, что

621.396 + 621.3.
Б-74



ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга явилась в результате наших изысканий в области высокочастотной изоляции, выполненных главным образом в последние годы.

За минувшее десятилетие перед этим важнейшим разделом изоляционной техники были поставлены чрезвычайно ответственные задачи. Новейшие отрасли радиотехники, радиолокация, телевидение, специальная радиотехника — выдвинули необходимость создания новых качественных электроизолирующих материалов и деталей.

Неорганические диэлектрики по ряду своих свойств наиболее полно удовлетворяют требованиям современной высокочастотной техники. Особое значение приобрела специальная керамика — радиокерамика. Если современные детали требуют новых материалов, то нередко в свою очередь открытие таких материалов приводит к необходимости изыскания новых конструкций деталей.

Современная радиокерамика настолько диференцировалась по своим показателям, что рациональное применение ее стало возможным только при глубоком изучении всех ее особенностей как технологических, так и физических.

Над нашей книгой мы работали в условиях бурного развития отечественной радиопромышленности. Нередко то, что являлось достижением текущего дня, в ближайший последующий период становилось прошедшим этапом. Это безусловно должно отразиться на содержании книги, в которой могут оказаться пробелы, требующие пополнений и уточнений. Но потребность в обзоре современных достижений в области высокочастотных неорганических диэлектриков велика и неотложна, и нам хотелось бы надеяться, что

предлагаемая книга, при всех ее возможных недочетах, окажется небесполезной.

Мы считаем своим долгом выразить глубокую благодарность Н. Д. Горбунову и Е. А. Гайлишу, оказывавшим нам постоянное содействие и внимание.

Такую же признательность мы приносим члену-корреспонденту Академии Наук СССР П. П. Кобеко, не раз помогавшему нам своими советами.

Авторы

ЧАСТЬ I

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Строение вещества и электрические свойства

Всякое физическое тело с точки зрения электрических свойств может быть отнесено к группе проводников, диэлектриков или полупроводников. Принадлежность к той или иной группе материалов определяется квантово-механическими взаимодействиями электронов атомов, из которых построено тело. Свойства вещества внутри каждой группы связаны со строением молекул, а также с самой структурой тела.

В зависимости от сложности молекул вещества, от типа межатомных связей (электровалентной, ковалентной и др.) различают атомные, ионные и молекулярные решетки. Решетки, в узлах которых находятся ионы или одинаковые атомы, называются соответственно ионными или атомными. Если в узлах находятся целые молекулы, решетку называют молекулярной. Строгой периодичностью структурных элементов отличаются решетки кристаллов; в аморфных телах такой периодичности нет.

По совокупности свойств следует различать органические и неорганические диэлектрики. Органические диэлектрики построены из нейтральных молекул, симметричных в электрическом отношении, или из дипольных молекул, отличающихся наличием электрического момента.

Неорганические диэлектрики в подавляющем большинстве случаев построены из ионов, связанных друг с другом электростатическими силами и способных (в отличие от зарядов многих дипольных молекул) отрываться от противоположно заряженных ионов, обычно в результате воздействия тепловой энергии или при растворении. Воздействие тепловой энергии или растворителя на органический нейтральный диэлектрик имеет следствием лишь разобщение друг от друга молекул, из которых он построен, но

не разобщение отдельных групп внутри молекулы. В редких случаях и неорганические диэлектрики построены из нейтральных атомов (например, сера).

От особенностей структуры зависят многие технические свойства материалов. Электропроводность металла определяется длиной свободного пути электронов. В кристаллической решетке металла незначительная примесь какого-либо другого металла резко увеличивает электрическое сопротивление первого, так как нарушает однородность структуры, независимо от того, каково абсолютное значение электропроводности примесного металла. Одновременно температурный коэфициент сопротивления загрязненного металла снижается в широкой области температур по сравнению с чистым металлом.

Электрические свойства изоляторов зависят также от особенности структуры. Важнейшую характеристику изоляторов — диэлектрические потери принято рассматривать именно в зависимости от их структуры.

Возникшая совсем недавно волновая теория вещества стерла резкую грань, которую проводила между металлами и диэлектриками классическая электронная теория. Согласно последней различали связанные электроны, участвующие в поляризации вещества, и электроны свободные, получившие в своей совокупности название электронного газа. Считали, что эти особенности электронов и создают принципиальное различие между металлами и диэлектриками.

С точки зрения волновой теории, электроны вещества могут переходить от одного атома к другому даже в том случае, если энергия их меньше высоты потенциального барьера, разделяющего атомы. Квантовая механика оперирует терминами „свободный“ и „связанный“ электрон, имея в виду переход их из одного состояния в другое и обмен электронами между энергетическими зонами. Количество электронов, находящихся в „свободном“ состоянии (в зоне проводимости), и „связанных“ электронов, определяется энергетическими характеристиками решетки.

Собственно-проводники (электронные проводники — металлы, их сплавы, ряд карбидов, нитридов) отличаются количеством энергетически разрешенных квантовых состояний, всегда бóльшим, чем число электронов в единице объема вещества. Число электронов проводимости в металле не меняется с изменением тепловой энергии. Количество свободных электронов в металле на 1 $см^3$, примерно, тоже, что и количество атомов, т. е. составляет число порядка 10^{22}.

Полупроводники, являясь промежуточной ступенью между металлами и диэлектриками, отличаются количеством свободных носителей тока на много порядков меньше, чем в

металле. В общем случае, т. е. при самых различных значениях электропроводности материала, зависимость ее от температуры, (согласно А. Ф. Иоффе), имеет вид, представленный на рис. 1. При низких температурах даже у полупроводников с большим удельным сопротивлением наблюдается возрастание сопротивления при увеличении температуры, так как в этой области число электронов проводимости не зависит от температуры, а подвижность заметно падает. В области высоких температур сопротивление полупроводника снижается за счет резкого возрастания числа носителей тока, превалирующего над снижением подвижности.

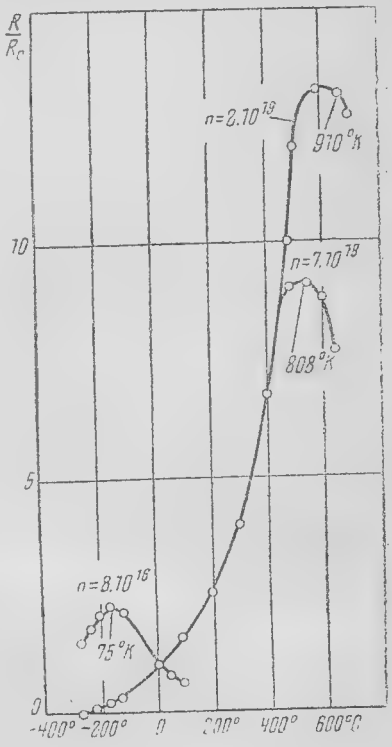


Рис. 1. Зависимость сопротивления от температуры для полупроводников.

Если в первое время развития электротехники различие между металлами и изоляторами сводилось лишь к количественной оценке их электропроводности, а позднее эти две группы материалов стали различать по характеру электропроводности (электронной, ионной), а также по степени связанности электронов внутри решетки,— в настоящее время на основании положений волновой механики исходным критерием являются энергетические признаки, и, как следствие этого, закон температурной зависимости сопротивления.

Гетерополярные диэлектрики отличаются преимущественно ионной электропроводностью, тем большей, чем выше температура (неорганические стекла, ионные кристаллы и др.). В чистых гомеополярных диэлектриках (алмазе, сере) обнаруживается электронная электропроводность, ничтожно малая по своему значению.

Большинство технических изоляторов характеризуется ионной электропроводностью, которая может быть обусловлена ионами самого вещества или ионами примеси. В то же время большая группа наиболее качественных изоляторов,— кристалловидные неорганические диэлектрики,—отличаются электрическими свойствами, которые несомненно определяют

ся электронно-проводящими примесями. В зависимости от технологии изготовления этих материалов диэлектрические потери могут быть очень высокими и очень низкими, следуя за электрическими свойствами примеси и ее структурным распределением в материале.

В общем случае любой реальный диэлектрик как неорганический, так и органический, следует рассматривать или как гетерогенную систему с дисперсионной средой, отвечающей идеальному выражению химического состава диэлектрика, и дисперсной фазой—примесями, рассредоточенными в основной среде, или как вещество, структура которого искажена примесями.

В следующих разделах книги будет подробно рассмотрен вопрос о влиянии примесей на электрические свойства диэлектриков.

§ 2. Диэлектрик в электрическом поле

Идеальный диэлектрик характеризуется только величинами диэлектрической проницаемости и электрической прочности. Реальным диэлектрикам свойственны, кроме того, сквозная электропроводность и диэлектрические потери, поскольку в них при наложении электрического поля возникают связанные с выделением тепла перемещения материальных частиц, электронов, ионов, диполей.

Изучаемые в отдельности различные свойства диэлектриков тесно связаны друг с другом.

Основным, характерным для любого диэлектрика процессом, является поляризация составляющих его частиц, т. е. обратимое смещение электрических зарядов, из которых построены эти частицы, возникающее в направлении поля и следующее за каждым изменением приложенного напряжения.

Поляризация диэлектрика при переменном напряжении определяет значение комплексной электропроводности, ее активные и реактивные составляющие.

Реактивные составляющие комплексной электропроводности являются предметом изучения диэлектрической проницаемости. Активные составляющие комплексной электропроводности являются предметом изучения диэлектрических потерь. Понятно, что только при переменном напряжении имеет смысл считаться с тепловыделением при поляризации, так как здесь оно, в противоположность поляризации при постоянном напряжении, не прекращается, а все время поддерживается.

Сквозная электропроводность также может быть учтена как составляющая диэлектрических потерь при переменном напряжении. Далее, тепловой пробой диэлектриков на пос-

гоянном или переменном напряжениях является лишь выражением лавинообразного возрастания сквозной электропроводности или диэлектрических потерь. Даже электрический пробой можно сводить к процессу сквозной электронной электропроводности, лавинообразно возрастающей в слабом месте диэлектрика.

Если представить изменение поляризационного тока в диэлектрике от времени в виде выражения

$$I_n = I_0 e^{-\frac{t_n}{T}}, \qquad (1)$$

т. е. поставить поляризационный ток в связь с физической константой материала T, то эту физическую константу можно характеризовать так же, как время, которое необходимо, чтобы начальный ток I_0 уменьшился в e раз (2,718). Время $t_n = T$ принято называть постоянной времени системы.

Практически удобно различать следующие виды поляризации диэлектрика:

1. Электронную поляризацию (деформацию электронных орбит).

2. Ионную поляризацию, обусловленную упругими смещениями ионов и характерную для любого ионного диэлектрика.

3. Дипольную поляризацию, охватывающую жидкое и вязкое состояние полярного вещества.

4. Структурную поляризацию, характерную для многих твердых диэлектриков, охватывающую область температур ниже T_g или ниже температуры плавления кристалла.

5. Низкочастотную (внутрислойную) поляризацию.

Согласно представлениям, развитым П. П. Кобеко, структурная поляризация зависит от плотности упаковки ионов или молекул, а следовательно, от их средней потенциальной энергий. Чем плотнее упаковка, чем больше заполнены места минимумов потенциальной энергии, тем меньше структурная поляризация и меньше структурные потери.

Структурная поляризация сводится к процессам перемещения ионов или диполей в ограниченном объеме, причем отношение времени установления теплового равновесия (времени релаксации) к периоду напряжения определяет активную мощность, выделяющуюся при данной частоте электрического поля.

В чисто кристаллических веществах неорганического происхождения структурная поляризация в подавляющем большинстве случаев не обнаруживается.

Низкочастотная поляризация, называемая также внутрислойной или высоковольтной, обусловливается передвижениями ионов внутри диэлектрика. При постоянном напряжении и при низких частотах в приэлектродных слоях или

во всей толще диэлектрика образуются объемные заряды, вызывающие искажения поля в диэлектрике. Распределение напряжения при этом непрямолинейно и зависит от химического состава и структуры диэлектрика. Отмеченные здесь изменения в веществе могут быть и необратимыми в том случае, если они вызваны не поляризационным, а сквозным электрическим током (в случае „формовки" диэлектрика).

Низкочастотная поляризация требует для своего развития наибольшего времени. Спадающий, так называемый абсорбционный ток, обусловленный низкочастотной поля-

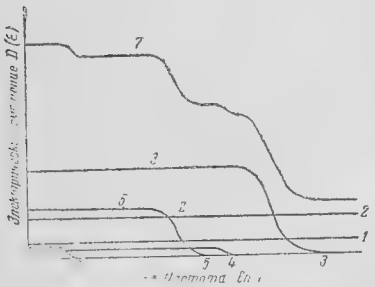


Рис. 2. Зависимость электрического смещения сложного диэлектрика от времени.

1 — составляющая собственного поля электродов; 2, 3, 4, 5, 6 — соответственно составляющие электронной, ионной, структурной, дипольной и внутрислойной поляризации; 7—суммарное значение электрического смещения.

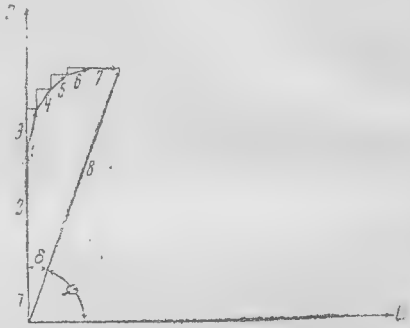


Рис. 3. Векторная диаграмма токов поляризации и сквозной проводимости в сложном диэлектрике.

1—ток собственного поля; 2—ток электронной поляризации; 3—ток ионной поляризации; 4—ток структурной поляризации; 5—ток дипольной поляризации; 6—ток внутрислойной поляризации; 7—сквозной ток; 8—полный ток.

ризацией, длится минуты и даже часы. При высоких частотах объемные заряды не успевают образоваться. Естественно также, что длительность зарядного тока и величина его вполне равноценны соответствующим значениям при разрядке (коротком замыкании) диэлектрика.

На рис. 2 показана зависимость от времени электрического смещения D сложного диэлектрика (плотности зарядов на обкладках конденсатора за счет мгновенной и замедленных поляризаций и собственного поля электродов), а на рис. 3 дана векторная диаграмма токов на переменном напряжении. Совершенно ясно, что в зависимости от частоты внешнего электрического поля нам приходится считаться с тем или иным механизмом тока в диэлектрике. Электронные и ионные смещения успевают завершиться

при частотах оптического и инфракрасного спектров; структурная и дипольная поляризации наблюдаются вплоть до радиочастот; наконец, внутрислойная поляризация выявляется главным образом при постоянном напряжении. В последнем случае, в начальный момент времени после включения напряжения на обкладках конденсатора возникают заряды за счет мгновенных упругих смещений в диэлектрике, а затем с течением времени количество их возрастает за счет замедленных видов поляризации.

Как видно из рис. 3, при переменном напряжении активный ток больше, чем сквозной ток при постоянном напряжении, так как здесь добавляются активные составляющие за счет поляризации в течение каждого полупериода, в том числе и ничтожно малая, сопутствующая ионной поляризации.

Величина так называемого нормального тока смещения, т. е. тока за счет мгновенной поляризации, вычисляется по „геометрической емкости" C заряжаемого конденсатора и по постоянным цепи R и L, согласно выражения:

$$i = C_1 e^{-\frac{RC - \sqrt{R^2C^2 - 4LC}}{2LC} t} + C_2 e^{-\frac{RC + \sqrt{R^2C^2 - 4LC}}{2LC} t}, \qquad (2)$$

являющегося решением общего уравнения

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{di}{dt} + \frac{i}{LC} = 0.$$

Обычно R и L очень малы и зарядный ток длится весьма малую долю секунды, падая до нуля.

Величину абсорбционного тока, обусловленного замедленной поляризацией, можно определить на основании выражения:

$$i_a = E_0 \frac{\alpha C}{T} e^{-\frac{t}{T}}, \qquad (3)$$

где E_0 — напряжение, приложенное к конденсатору,
C — емкость;
T — постоянная времени;
α — постоянная, характеризующая диэлектрик.

Глава 1

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

§ 3. Понятие о диэлектрической проницаемости и емкости

Обычное формальное определение диэлектрической проницаемости как отношения емкостей конденсатора с диэлектриком и без него не раскрывает физических процессов, выражением которых является эта величина. Диэлектриче-

скую проницаемость материала связывают также с явлениями распространения световых колебаний в веществе. Наконец, дается определение диэлектрической проницаемости как отношения силы механического взаимодействия зарядов в вакууме и в данной среде. Естественно, что особенности вещества, с точки зрения возникновения в нем поляризационных токов, определяют и величину диэлектрической проницаемости. Если диэлектриком является вакуум, то поляризации среды, конечно, нет. Однако электрическое поле вне источника напряжения является неотъемлемой его частью так же, как и для всякого заряженного тела.

Когда к конденсатору, диэлектриком которого является вакуум, приложено постоянное напряжение, электрическое поле определяет механические силы притяжения электродов. В частности именно межмолекулярные поля обусловливают механическую прочность твердого тела, рассчитываемую на основании соотношений Кулона-Борна.

В общем случае, когда имеется обычный невакуумный конденсатор и к нему приложено переменное напряжение, составляющие полной мощности цепи можно рассматривать следующим образом.

Реактивная составляющая определяет величину емкостного тока и обусловливает механические взаимодействия электродов друг с другом и с окружающими телами. Активная составляющая электрической мощности отвечает тепловыделению при перемещении зарядов в электрической системе (в электродах и в диэлектрике).

Практический интерес представляют две электрические системы, в которых мы пренебрегаем затратами мощности на тепловыделение в диэлектрике:

1) электрически-свободная система, где заряженный конденсатор изолирован от источника питания;

2) электрически-связанная система, где конденсатор неразрывно связан с источником питания.

Проследим изменения электрического состояния этих систем, исходя из представлений об их энергии.

Электрическая энергия изолированной системы выражается формулой:

$$W = \frac{Q^2}{2C}, \tag{4}$$

где Q—величина заряда, а C—емкость системы.

В случае синусоидального переменного напряжения мы рассматриваем реактивную мощность, которая находится из выражения

$$P = \frac{I^2}{\omega C}. \tag{5}$$

Физический смысл, который вкладывается в понятие „емкость конденсатора", сводится к энергетической его характеристике. При постоянном заряде энергия конденсатора тем больше, чем меньше емкость, и наоборот. Диэлектрическая проницаемость является коэфициентом, показывающим, во сколько раз изменяется энергия запасенная электрической системой при замене в поле этой системы вакуума любым другим диэлектриком.

Если в изолированном конденсаторе первоначально пластины были разделены вакуумом, а затем в него вводится твердый диэлектрик, то электрическая энергия конденсатора уменьшается в ε раз, и во столько же раз уменьшается механическая сила взаимодействия обкладок. Напряженность электрического поля при этом также падает в ε раз. Разность потенциальной энергии системы до и после введения диэлектрика равна работе на его поляризацию (если пренебречь потерями), другими словами, равна механической работе, затраченной на втягивание диэлектрика.

Рассмотрим еще один случай преобразования электрической энергии в такой изолированной системе. К заряженному конденсатору, пластины которого разделены вакуумом, мы подключаем в параллель еще один такой же конденсатор. Электрическая энергия после этого перераспределится, но каждый конденсатор будет обладать электрической энергией вчетверо, а не вдвое меньшей, против первоначальной. Объясняется это тем, что потенциальная энергия всей системы после подключения второго конденсатора уменьшилась вдвое, и, следовательно, на каждый конденсатор приходится вчетверо меньшая электрическая энергия. В данном случае половина энергии системы теряется на джоулевое тепло в проводах, соединяющих конденсаторы, независимо от сопротивления проводов.

Электрически связанная система отличается от свободной тем, что при всяком изменении емкости конденсатора, т. е. при изменении его возможной энергии, в цепи возникает ток того или другого направления в зависимости от увеличения или уменьшения емкости. Если например, емкость конденсатора возросла, то в противоположность предыдущему случаю в него поступают дополнительные заряды из источника напряжения, в результате чего при неизменном значении напряжения энергия конденсатора увеличится.

§ 4. Поляризованный диэлектрик

Диэлектрик, в котором происходит поляризация разного вида, удобно рассматривать при постоянном приложенном к нему напряжении.

Эквивалентной схемой такого диэлектрика служит ряд включенных параллельно к источнику напряжения конденсаторов, как это показано на рис. 4. Схема диэлектрика предусматривает всевозможные виды поляризации в веществе. Каждый конденсатор отвечает определенному механизму зарядного тока и отличается величиной своей емкости. Очевидно, что заряды на обкладках, обусловленные электрическим полем и электронной поляризацией (емкости C_0 и $C_э$) обязательны при любом диэлектрике. Остальные типы поляризации в диэлектрике (емкости $C_и$—$C_н$) могут быть, а могут и не быть, в зависимости от особенностей диэлектрика.

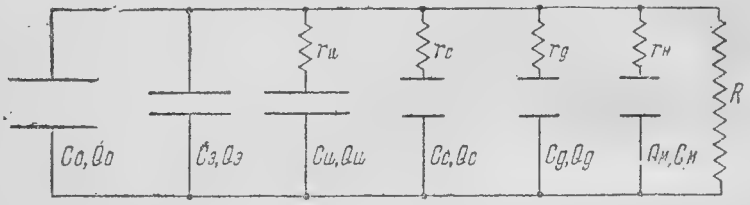


Рис. 4. Эквивалентная схема поляризованного диэлектрика сложного состава.

C_0, Q_0 — емкость и заряд в вакууме; $C_э$, $Q_э$ — емкость и заряд электронной поляризации; $C_и$, $Q_и$—то же ионной поляризации; C_c, Q_c — то же структурной поляризации; C_g, Q_g — то же дипольной поляризации; $C_н$, $Q_н$ —то же низкочастотной (внутрислойной) поляризации; $r_и$, r_c, r_g, $r_н$ — сопротивления, эквивалентные потерям при соответствующих поляризациях; R—сопротивление сквозному току.

Конденсатор C_0 соответствует собственному полю электродов, заряд которых можно определить, если в пространстве между пластинами нет диэлектрика (вакуум), причем плотность этого заряда определяет напряженность поля и в диэлектрике, как это следует из теоремы Гаусса. Конденсаторы $C_и$ —$C_н$, отвечающие поляризации вещества, находящегося между пластинами, включены последовательно с омическими сопротивлениями, так как поляризация всегда связана с тепловыделением. Все конденсаторы шунтированы омическим сопротивлением, которое определяет сквозной ток от одного электрода к другому (ток утечки).

Включение в цепь конденсаторов и сопротивлений происходит в разные времена и с разной длительностью. Электронная и ионная поляризации следуют за электрическим полем конденсатора C_0. Структурная, дипольная и низкочастотная—требуют для своего развития определенного времени. Естественно, что замедленные типы поляризации особенно заметны при постоянном напряжении и могут не обнаруживаться при высоких частотах.

Количество электричества на электродах диэлектрика будет равно:

$$Q_{\Sigma} = Q_{o} + Q_{эп} + Q_{ип} + Q_{дп} + Q_{сп} + Q_{нп}, \tag{6}$$

$$Q_{\Sigma} = UC_{o} \cdot \varepsilon = Q_{o} \cdot \varepsilon. \tag{7}$$

Эффективная диэлектрическая проницаемость такого диэлектрика определится соотношением:

$$\varepsilon = 1 + \frac{Q_{эп}}{Q_{o}} + \frac{Q_{ип}}{Q_{o}} + \quad \cdot \cdot \cdot \frac{Q_{нп}}{Q_{o}} \tag{8}$$

или

$$\varepsilon = 1 + 4\pi\varepsilon_{эп} + 4\pi\varepsilon_{ип} + \cdot \cdot \cdot 4\pi\varepsilon_{нп}. \tag{9}$$

Как известно, выражения для напряженности поля, механической силы и количества электрического заряда объединяются законом Кулона, который получил значение отправного пункта при разработке теории электрических явлений в диэлектриках и проводниках.

Гауссом был установлен закон упругого перемещения зарядов. Ом дал закон неупругого перемещения зарядов.

По закону Ома для проводника напряженность поля

$$E = \frac{Q_{\text{сквозн}}}{\gamma s \cdot \tau}. \tag{10}$$

По закону Гаусса* для однородного поля в диэлектрике

$$E = 4\pi \frac{Q}{\varepsilon \cdot s}, \tag{11}$$

где Q — величина заряда, γ — удельная электропроводность, ε — диэлектрическая проницаемость, s — площадь, нормальная линиям сил зарядов, τ — время.

Теория электрического поля в диэлектриках основывается на законе Гаусса и постулате Максвелла о поверхностной плотности зарядов на электродах конденсатора, связанного с источником питания.

Согласно постулату Максвелла:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{o} + \sigma_{п} = \frac{1}{4\pi} \frac{U}{d} + \varepsilon_{п} \frac{U}{d} \tag{12}$$

или

$$4\pi\sigma_{\Sigma} = \frac{U}{d} + 4\pi\varepsilon_{п} \frac{U}{d}, \tag{13}$$

*) Уравнения приведены в нерациональной форме.

где: σ_{Σ} — суммарная плотность зарядов на электродах;

σ_0 — плотность зарядов на электродах в случае диэлектрика — вакуума;

$\sigma_п$ — плотность зарядов на электродах за счет поляризации диэлектрика;

U — напряжение источника питания;

d — расстояние между пластинами конденсатора;

$\varepsilon_п$ — суммарная постоянная поляризации.

Следствием законов Гаусса и Максвелла является ряд чисто формальных определений:

$$\varepsilon = 1 + 4\pi\varepsilon_п, \tag{14}$$

$$D = \varepsilon\frac{U}{d} = \varepsilon E = 4\pi\sigma_{\Sigma}, \tag{15}$$

$$I = \sigma_п = \varepsilon_п\frac{U}{d} = \varepsilon_п E, \tag{16}$$

где: ε — эффективная диэлектрическая проницаемость;

D — индукция, или так называемое смещение в диэлектрике;

I — электрический момент единицы объема (так называемая поляризация вещества);

E — напряженность электрического поля (средняя).

Согласно Максвеллу

$$\frac{Q_п}{Q_0} = 4\pi\varepsilon_п. \tag{17}$$

В пределах электрической прочности постоянные электронной и ионной поляризации не зависят от напряженности электрического поля (рис. 5), если материал не отличается спонтанной поляризацией, характерной для сегнетэлектриков. Поэтому отвечающие им индукция D и поляризация I возрастают линейно с увеличением напряженности поля. Наоборот, дипольная поляризация обнаруживает насыщение при высоких напряженностях электрического поля.

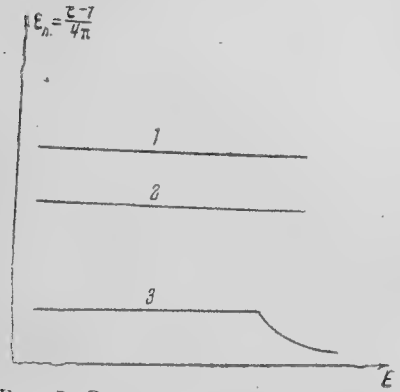


Рис. 5. Зависимость постоянной поляризации от напряженности поля. 1 — электронная поляризация; 2 — ионная поляризация; 3 — дипольная поляризация.

Абсолютные значения диэлектрической проницаемости различных диэлектриков зависят от характера поляризации вещества. На-

именьшие значения ε обнаруживаются в случае чисто электронной поляризации. В этом случае диэлектрическая проницаемость в соответствии с положениями Максвелла точно равна квадрату показателя преломления. Чисто электронной поляризацией отличаются только неполярные диэлектрики.

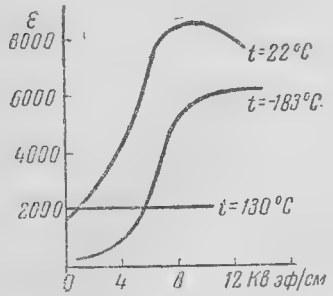


Рис. 6. Диэлектрическая проницаемость титаната бария в зависимости от напряженности поля частоты 50 *гц* при разных температурах.

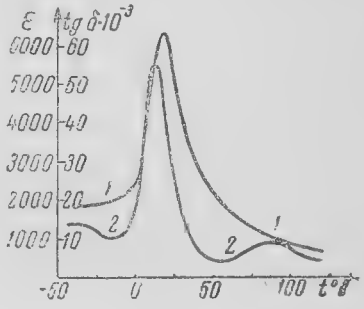


Рис. 7. Зависимость диэлектрической проницаемости (*1*) и tg δ (2) керамического сегнетоэлектрика от температуры.

В таблице 1 приведены значения показателя преломления в первой и второй степени и диэлектрические проницаемости нейтральных и слабополярных веществ.

Если диэлектрик ионного или дипольного строения, то диэлектрическая проницаемость его может быть значи-

Таблица 1

Нейтральные и слабополярные диэлектрики

Название материала	Показатель преломления		Диэлектрическая проницаемость ε
	n_D	n_D^2	
Парафин	1,43	2,06	1,9—2,2
Полистирол	1,55	2,4	2,7—2,9
Алмаз	2,4	5,76	5,6—5,8
Сера	1,92	3,69	3,6—4,0

тельно больше, чем квадрат показателя преломления. Ниже приведены значения диэлектрической проницаемости неко-

7703
Центральной ВНБ

торых ионных диэлектриков с электронной и ионной поляризациями (Al_2O_3, NaCl и др.), а также со структурной поляризацией (неорганическое стекло), и диэлектрическая проницаемость ε дипольных диэлектриков.

	1. Ионные диэлектрики	ε	2. Дипольные диэлектрики	ε
Положит. ТК ε	Кристаллический Al_2O_3 (корунд)	10	Бакелит	4—5
	Кристаллический MgO	9	Канифоль	3,5
	Мрамор $CaCO_3$	9	Касторовое масло	4,3
	Каменная соль NaCl	4,3	Целлюлоза	4,5
	Фарфор	6,5	Галовакс	5,0
	Стекло (щелочное)	6,5		
Отриц. ТК ε	Рутил TiO_2	110		
	Титанат кальция $CaTiO_3$	160		
	Титанат стронция $SrTiO_3$	220		

Ионные неорганические диэлектрики, как правило, имеют значительно более высокие диэлектрические проницаемости, чем дипольные органические диэлектрики.

Особую группу твердых диэлектриков составляют вещества, характеризующиеся нелинейной зависимостью электрического смещения от напряженности поля. Диэлектрическая проницаемость таких веществ, называемых сегнетэлектриками, меняется с изменением напряженности поля. Особенностью сегнетэлектриков является высокое значение диэлектрической проницаемости (более 1000) и большая зависимость диэлектрической проницаемости от температуры с резко выраженным максимумом. К таким веществам относится метатитанат бария $BaTiO_3$, впервые исследованный Б. М. Вулом.

На рис. 6 показана зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария от напряженности поля. При циклическом изменении приложенного напряжения эта зависимость образует гистерезисную петлю, аналогичную кривой магнитного гистерезиса. Площадь этой кривой выражает в известном масштабе диэлектрические потери в образце за один период. Сегнетэлектрики характеризуются значительными диэлектрическими потерями.

На рис. 7 представлена зависимость диэлектрической проницаемости и tgδ другого керамического сегнетэлектрика, представляющего собой соединение титаната бария и титаната стронция от температуры.

Сегнетэлектрические свойства указанных материалов теряются при определенной температуре, называемой точкой Кюри. Для метатитаната бария эта температура лежит около 100°.

§ 5. Предвычисление диэлектрической проницаемости

Качественные и количественные соотношения между величиной диэлектрической проницаемости и физическими характеристиками вещества,—соотношения, которые могли бы позволить предвычисление диэлектрической проницаемости при разных температурах и частотах,—в настоящее время еще только устанавливаются.

Диэлектрическую проницаемость (постоянную поляризации) можно поставить в зависимость от плотности вещества, молекулярного веса, коэфициента преломления, коэфициента сжимаемости, если ввести еще одну, третью константу (помимо ε и $\varepsilon_п$), характеризующую уже не диэлектрик, а молекулы или ионы его составляющие. Константу эту называют постоянной поляризации молекулы или иона (поляризуемостью молекулы или иона) и обозначают α.

$$I = \varepsilon_п \cdot E_{ср} = \varepsilon_п \cdot \frac{U}{d},$$

а суммарная диэлектрическая проницаемость

$$\varepsilon = 1 + 4\pi\varepsilon_{пэ} + 4\pi\varepsilon_{пи} + \ldots 4\pi\varepsilon_{пн}.$$

Однако возникает вопрос под действием какого поля, какой напряженности находится элементарная молекула или ион? Гендрик Лорентц, учитывая микроскопическую неоднородность диэлектрика, обосновал, что на частицу диэлектрика действует не среднее поле, определяемое как отношение напряжения, приложенного к образцу, к его толщине, а значительно большее, так называемое локальное поле E'. В этом случае для единицы объема диэлектрика электрический момент

$$I = \alpha \cdot n \cdot E', \qquad (18)$$

где n—число ионов в 1 $см^3$; α — поляризуемость иона.

Если искусственным приемом ограничить рассматриваемый ион или диполь и частицы ближнего порядка сферой, которой диэлектрик принимается однородно поляризованным, и вычесть поле этого иона или диполя из общего реактивного поля, то не представит труда, следуя Лорентцу, получить для изотропного диэлектрика

$$E' = E_{ср} + \frac{4}{3}\pi I. \qquad (19)$$

Выражение (19) имеет в виду безусловную справедливость старого максвелловского соотношения, связывающего пос-

тоянную поляризацию (диэлектрическую проницаемость) с внешним полем $E_{ср}$:

$$I = \varepsilon_{п} E_{ср} = \frac{\varepsilon - 1}{4\pi} E_{ср} . \qquad (20)$$

Решая совместно уравнения (18), (19) и (20), мы исключаем внешнее и локальное поле $E_{ср}$ и E' и приходим к известному выражению Лоренц-Лорентца и Клаузиуса-Мосотти, связывающему диэлектрическую проницаемость ε (или n_D^2) с поляризуемостью молекулы α.

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \cdot \frac{M}{d} = \frac{4}{3} \pi N \alpha_0 ,$$

где N — число Авогадро, d — плотность, M — молекулярный вес, α имеет размерность объема, и для многих ионных кристаллов является величиной порядка

$$(10^{-8})^3 = 10^{-24} \ см^3.$$

Выражение (19) и само уравнение Клаузиуса-Мосотти справедливо для газов, неполярных жидкостей и кристаллов кубической структуры, когда можно пренебречь дополнительным полем внутри Лорентцовой сферы.

Борн рассматривает только одно поляризующее поле, напряженность которого определяется как частное от деления напряжения, приложенного к образцу, на расстояние между электродами (т. е. среднее поле $E_{ср}$).

В работе, опубликованной в 1933 г. и посвященной теории поляризации ионных кристаллов, Борн определяет диэлектрическую проницаемость как сумму двух составляющих: за счет электронной деформации ε_0 (равной квадрату показателя преломления вещества), и составляющей за счет ионной поляризации. Постоянная ионной поляризации по Борну является произведением из числа ионов в 1 $см^3$ на поляризуемость иона α

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + 4\pi\varepsilon_{п} = \varepsilon_0 + 4\pi n\alpha.$$

Последнее выражение связано с физическими характеристиками вещества — плотностью, молекулярным весом, валентностью, собственной частотой кристаллической решетки, ее структурой,

$$\varepsilon = n_D^2 + \frac{\lambda^2 \cdot F^2 \cdot Z^2 \cdot P \cdot \rho}{\pi c^2 \cdot M_1 \cdot M_2} ,$$

где Z — валентность иона; M_1 и M_2 — молекулярные веса ионов; F — электрохимический эквивалент; ρ — плотность вещества; c — скорость света; P — постоянная решетки; n_D — показатель преломления; λ — длина волны, отвечающая собственным колебаниям решетки.

Экспериментальные данные не согласуются в широком диапазоне значений ε с теорией Борна. При больших значениях диэлектрической проницаемости теоретические результаты по Борну оказываются резко преуменьшенными против экспериментальных.

Г. И. Сканови объясняет высокую диэлектрическую проницаемость ионных кристаллов типа рутила и перовскита влиянием добавочного внутреннего поля при ионном смещении на электронную поляризацию.

Для случая дипольной поляризации диэлектрика соотношения между диэлектрической проницаемостью и поляризуемостью молекул впервые были даны Дебаем и далее уточнены Кирквудом. Соотношения эти базируются на представлениях о локальном поле в дипольном диэлектрике.

§ 6. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости

Зависимость ε от температуры диэлектрика проявляется при любом типе поляризации — электронной, ионной или дипольной.

Постоянная электронной поляризации молекулы не зависит от температуры. Однако в связи с тем, что с ростом температуры уменьшается плотность диэлектрика (число молекул в 1 $см^3$), электронная поляризация $I_э = \alpha_э \cdot nE$ уменьшается, а, следовательно, уменьшается и диэлектрическая проницаемость материала.

На рисунке 8 показана зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для парафина, типичного неполярного диэлектрика, отличающегося чисто электронной поляризацией. Линейная зависимость претерпевает при температуре 50 — 55° излом, в связи с переходом вещества в новое агрегатное состояние.

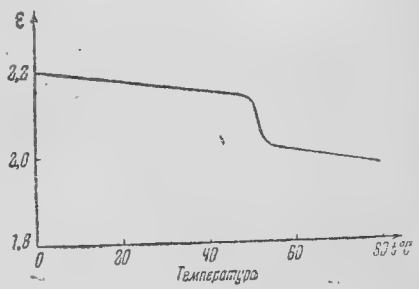


Рис. 8. Зависимость диэлектрической проницаемости нейтрального диэлектрика (парафина) от температуры.

Если диэлектрик отличается ионным строением, то при изменении его температуры изменяется не только плотность, но и поляризуемость ионов $\alpha_и$. Плотность ионного диэлектрика всегда уменьшается с возрастанием температуры, а поляризуемость, как правило, увеличивается. Для подавляющего большинства технических диэлектриков преобладающее значение имеет последний фактор, вследствие чего температурный коэфициент диэлектрической проницаемости

ионных кристаллов и стекол, как правило, положителен, и диэлектрическая проницаемость возрастает с температурой вначале линейно, а затем быстрее. Ионные диэлектрики, даже с ничтожно-малыми диэлектрическими потерями (такие, как каменная соль, мрамор, алюминоксид, слюда), характеризуются достаточно высокой диэлектрической проницаемостью и заметным положительным температурным коэфициентом ее. Особенно большим температурным коэфициентом диэлектрической проницаемости отличаются неорганические стекла с резко выраженной структурной поляризацией (щелочные), а также те неорганические материалы, где щелочное стекло входит составной частью, например, изоляторный фарфор. Приводим значения $\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon\Delta t}$ для ионных кристаллов, фарфора и технических стекол.

Температурный коэфициент диэлектрической проницаемости для ионных диэлектриков

Название диэлектрика	$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon\Delta t}$ в пределах 20° — 100° при радиочастотах
Кристаллический Al_2O_3 (алюминоксид)	$+100 \cdot 10^{-6}$
Каменная соль NaCl	$+150 \cdot 10^{-6}$
Слюда	$+ 20 \cdot 10^{-6}$
Кристаллический MgO	$+100 \cdot 10^{-6}$
Стекло (баритовое)	$+100 \cdot 10^{-6}$
Стекло (щелочное)	$+500 \cdot 10^{-6}$
Изоляторный фарфор	$+450 \cdot 10^{-6}$
Ультрафарфор	$+100 \cdot 10^{-6}$

На рис. 9, 10 и 11 даны температурные зависимости диэлектрической проницаемости для каменной соли, изоляторного фарфора, ультрафарфора и некоторых стекол.

Особую группу ионных диэлектриков представляют кристаллы двуокиси титана, титанаты двухвалентных металлов и вообще титановая керамика. Эти материалы обычно отличаются отрицательным температурным коэфициентом диэлектрической проницаемости, природа которой в настоящее время изучается.

Метатитанат бария, относящийся к классу сегнетэлектриков, как видно из рис. 7, отличается переменным температурным коэфициентом диэлектрической проницаемости, очень большим по абсолютному значению вблизи температур, отвечающих максимальному значению.

Согласно исследованиям Г. И. Сканови, отрицательный температурный коэфициент диэлектрической проницаемости рутила и перовскита объясняется, как было указано, преобладающей электронной поляризацией, которая с ростом температуры уменьшается за счет уменьшения плотности.

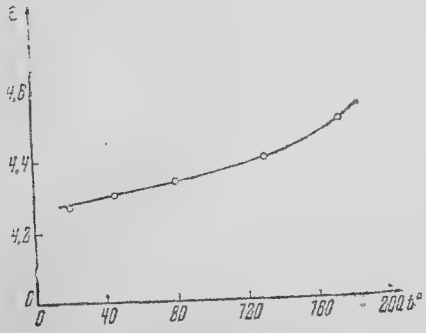


Рис. 9. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости каменной соли при $f = 50$ *гц*.

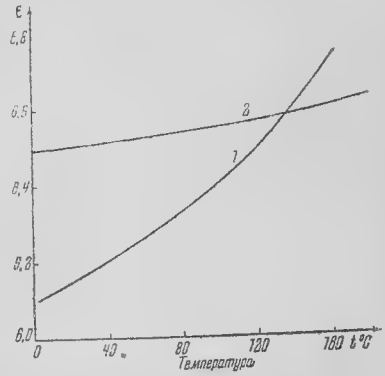


Рис. 10. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости керамики при $f = 10^6$ *гц*.
1—изоляторный фарфор;
2—ультрафарфор

Приводим значения температурного коэфициента диэлектрической проницаемости титаносодержащих диэлектриков

Температурный коэфициент титаносодержащей керамики

Название диэлектрика	$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon\Delta t}$ в пределах 20° — 100° при радиочастотах
Кристаллический TiO_2 (рутил)	$-750 \cdot 10^{-6}$
Тиконд	$-(500 \div 700) \cdot 10^{-6}$
Титанат кальция	$-(1200 \div 1500) \cdot 10^{-6}$
Титанат магния	$+50 \cdot 10^{-6}$

Зависимость диэлектрической проницаемости (емкости) от температуры для тиконда при разных частотах приведена на рис. 12.

Полярные органические вещества, помимо электронной поляризации, обладают собственно дипольной составляющей молекулярной поляризации, которая уменьшается

с ростом температуры. Зависимость молекулярной поляризации дипольного диэлектрика от температуры может быть выражена уравнением:

$$P = A + \frac{B}{T},$$

где A — составляющая за счет деформационной поляризации дипольной молекулы;

$\frac{B}{T}$ — составляющая за счет ориентационной поляризации.

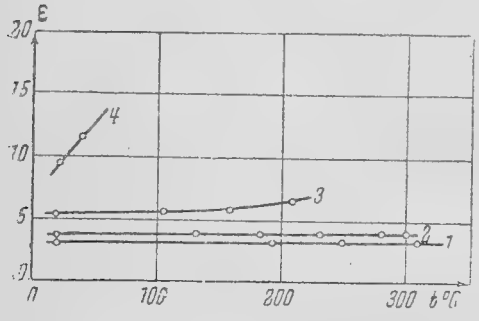


Рис. 11. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости стекол разного состава при $f = 50$ *гц*.
1—чистый B_2O_3; 2—97% B_2O_3—3% K_2O; 3—80% B_2O_3—20% K_2O; 4—69% B_2O_3—31% Na_2O.

По новой теории локального поля, предложенной Кирквудом, молекулярная поляризация и диэлектрическая проницаемость дипольного диэлектрика связаны следующим образом:

$$\frac{(\varepsilon-1)(2\varepsilon+1)}{9\varepsilon} = \frac{4}{3}\pi n\left(\alpha+\frac{\mu M}{3kT}\right), \quad (21)$$

где α — деформационная поляризуемость молекулы;

μ — эффективный дипольный момент молекулы;

M — полный момент, индуцированный в сфере;

k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура;

n — число молекул в 1 $см^3$.

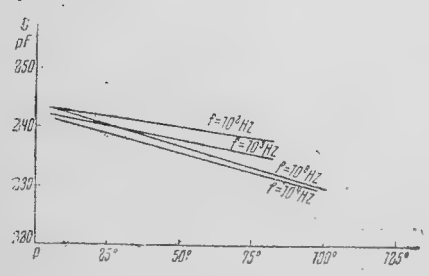


Рис. 12. Зависимость емкости от температуры при разных частотах для тиконда.

Как видно из рис. 13, диэлектрическая проницаемость дипольного диэлектрика при увеличении температуры вначале меняется мало, затем круто возрастает и, наконец, начинает снижаться так, как это дает выражение (21). Температура t_1, при которой происходит резкое возрастание ε,

соответствует температуре размягчения вещества, переходу из твердого в вязкое состояние. Дипольные молекулы с этого момента получают свободу движения и, ориентируясь все более и более с уменьшением вязкости, т. е. с повышением температуры, под действием поля создают дополнительную поляризацию диэлектрика. Чем больше дипольный момент молекул жидкости, тем значительней изменение диэлектрической проницаемости при переходе из вязкого состояния в твердое. Например, для этилового спирта при высоких частотах ε изменяется от 9,7 при $t_1 = -120^0$C, до 50 при $t_2 = -110^0$ С. При температуре t_2 диэлектрическая проницаемость достигает наибольшего значения, когда вязкость уже настолько мала, что все диполи полностью ориентируются. При более высоких температурах ε

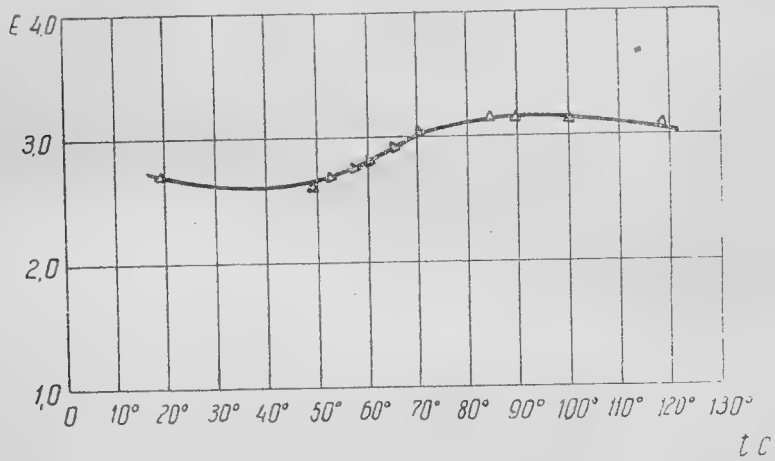


Рис. 13. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости дипольного диэлектрика (русской канифоли) при $f = 50$ *гц*.

начинает слегка уменьшаться согласно уравнению (21) за счет дезориентации диполей возрастающим тепловым движением молекул. При более высокой частоте кривая рис. 13 несколько сместится вправо.

§ 7. Температурная зависимость емкости системы конденсаторов. Диэлектрическая проницаемость смесей

Независимо от конфигурации конденсатора (плоской или цилиндрической), температурный коэфициент емкости (*TKE*) связан с температурным коэфициентом диэлектрической проницаемости (*TK*ε) выражением:

$$\frac{\Delta C}{C \Delta t} = \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon \Delta t} + \alpha_{tl},$$

где $\alpha_{л}$ — коэфициент линейного расширения диэлектрика. Таким образом:

$$TKE = TK\varepsilon + \alpha_{л}. \qquad (22)$$

Это выражение является результатом диференцирования по температуре, емкости, диэлектрической проницаемости и линейных размеров в обычных формулах плоского или цилиндрического конденсатора, связывающих эти величины.

Непосредственным измерением определяют температурный коэфициент емкости конденсатора. Разницей между TKE и $TK\varepsilon$ в случае неорганических материалов с малым $\alpha_{л}$ обычно пренебрегают.

Если два конденсатора соединены параллельно, то нетрудно найти температурный коэфициент суммарной емкости TKE_{Σ}, зная емкости и TKE каждого из конденсаторов

$$C_{\Sigma} = C_1 + C_2.$$

Диференцирование этого равенства по температуре дает:

$$\frac{dC_{\Sigma}}{dt} = \frac{dC_1}{dt} + \frac{dC_2}{dt}.$$

Делим затем обе части уравнения на суммарную емкость C_{Σ}, а также вводим в числитель и в знаменатель первой части уравнения емкости C_1 и C_2:

$$\frac{dC_{\Sigma}}{C_{\Sigma}\,dt} = \frac{C_1\,dC_1}{C_{\Sigma}\,C_1\,dt} + \frac{C_2\,dC_2}{C_{\Sigma}\,C_2\,dt}.$$

Таким образом

$$TKE_{\Sigma} = \frac{C_1}{C_{\Sigma}}\,TKE_1 + \frac{C_2}{C_{\Sigma}}\,TKE_2 \qquad (23)$$

В случае, если два конденсатора соединены последовательно,

$$\frac{1}{C_{\Sigma}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

После диференцирования по температуре, получаем

$$-\frac{dC_{\Sigma}}{C^2_{\Sigma}\,dt} = -\frac{dC_1}{C^2_1\,dt} - \frac{dC_2}{C^2_1\,dt}.$$

Умножив все члены равенства на C_{Σ}, имеем:

$$TKE_{\Sigma} = \frac{C_{\Sigma}}{C_1}\,TKE_1 + \frac{C_{\Sigma}}{C_2}\,TKE_2. \qquad (24)$$

§ 7. Диэлектрическая проницаемость смесей

Диэлектрическая проницаемость сложных диэлектриков, представляющих собой смесь компонент с различными диэлектрическими проницаемостями, может быть в первом приближении (при не слишком большом различии ε компонент) определена на основании уравнения Лихтенекера, которое в общем случае имеет в виду расчет самых различных свойств (например, теплопроводности, показателя преломления и др.)

$$\varepsilon^x = \vartheta_1 \varepsilon_1^x + \vartheta_2 \varepsilon_2^x . \tag{25}$$

Здесь ε, ε_1 и ε_2 — соответственно диэлектрические проницаемости смеси и отдельных компонент;

ϑ_1 и ϑ_2 — объемные концентрации компонент, удовлетворяющие соотношению $\vartheta_1 + \vartheta_2 = 1$;

x — константа, характеризующая распределение компонент и принимающая значение от $+1$ до -1.

При параллельном включении компонент $x = 1$ и выражение (25) имеет вид:

$$\varepsilon = \vartheta_1 \varepsilon_1 + \vartheta_2 \varepsilon_2 . \tag{26}$$

При последовательном включении компонент, когда $x = -1$, мы имеем:

$$\frac{1}{\varepsilon} = \frac{\vartheta_1}{\varepsilon_1} + \frac{\vartheta_2}{\varepsilon_2} . \tag{27}$$

Наконец, когда обе компоненты распределены хаотически (что как раз имеет место в ряде интересующих нас технических диэлектриков, например, керамике), уравнение Лихтенекера дает:

$$\ln\varepsilon = \vartheta_1 \ln\varepsilon_1 + \vartheta_2 \ln\varepsilon_2 . \tag{28}$$

Температурный коэфициент диэлектрической проницаемости сложного диэлектрика определяется на основании дифференцирования уравнения (28) по температуре, что дает:

$$\frac{1}{\varepsilon}\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\vartheta_1}{\varepsilon_1}\frac{d\varepsilon_1}{dt} + \frac{\vartheta_2}{\varepsilon_2}\frac{d\varepsilon_2}{dt} . \tag{29}$$

Используя соотношения (28) и (29) и зная свойства сложного технического диэлектрика и свойства его компонент, можно в ряде случаев определить, возникает ли новое химическое соединение, а также рассчитать по электрическим данным концентрацию компонент.

Концентрационные зависимости диэлектрической проницаемости и температурного ее коэфициента, в соответствии с приведенными выше аналитическими выражениями, по данным Г. А. Смоленского представлены на рис. 14 и 15.

Уравнение (29) имеет практическое применение в частности для расчетов конденсаторных керамических материалов с заданным температурным коэфициентом диэлектрической проницаемости. Ряд составов изготовляемой в настоящее время в Союзе так называемой „термокомпенсированной керамики", т. е. керамики для конденсаторов с ничтожно малым температурным коэфициентом емкости, подчиняются приведенному выше уравнению (29).

§ 8. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости

При чисто электронной поляризации диэлектрика частотная зависимость диэлектрической проницаемости отсутствует. Практически отсутствует частотная зависимость и при ионной поляризации. Электронная и ионная поляризации, как было сказано ранее, проходят за ничтожно малое время на несколько порядков меньше, чем самые быстрые высокочастотные колебания, освоенные в настоящее время в технике. Из рис. 16 видно, что диэлектрическая проницаемость нейтральных и ряда ионных диэлектриков остается неизменной при самых различных частотах от нуля до 10^6 *гц*.

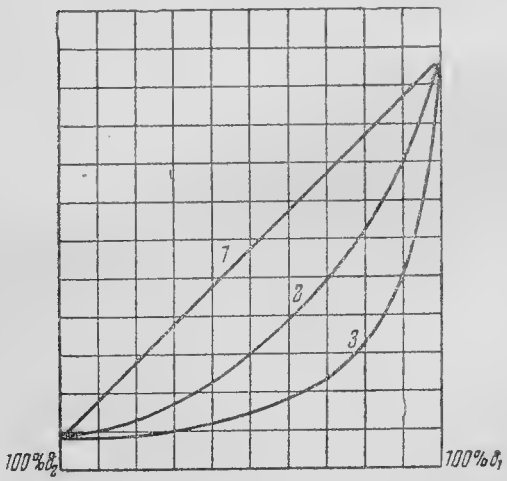


Рис. 14. Зависимость диэлектрической проницаемости смеси от объемных концентраций компонент для случая:
1—параллельного включения; 2—последовательного включения; 3—хаотичного распределения компонент.

Ионные диэлектрики, отличающиеся структурной поляризацией или электропроводностью, резко возрастающей с температурой, обладают диэлектрической проницаемостью, которая всегда уменьшается при возрастании частоты. При переходе от технических частот к радиочастотам процессы поляризации, обусловленные тепловой энергией, начинают не успевать следовать за частотой электрических колебаний; при очень низких частотах и постоянном напряжении диэлектрическая проницаемость получает наибольшее значение. Неорганические стекла, а также керамика, отличающиеся заметными электропроводностью и диэлектрическими

потерями, имеют ε, возрастающую при уменьшении частоты тем больше, чем выше температура. На рис. 17 и 18 показана зависимость диэлектрической проницаемости от часто-

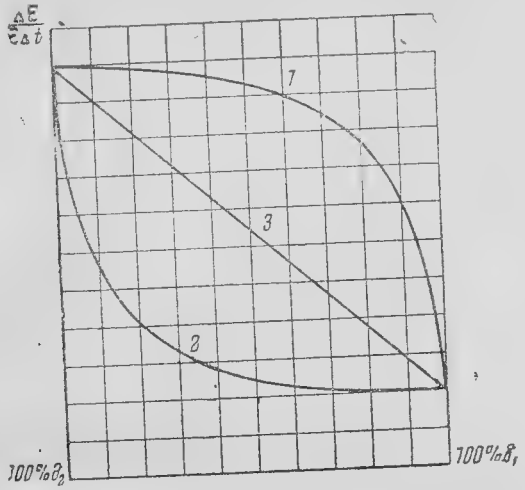


Рис. 15. Зависимость температурного коэфициента диэлектрической проницаемости смеси от объемных концентраций для случая:
1—параллельного включения компонент;
2—последовательного включения компонент;
3—хаотичного распределения компонент.

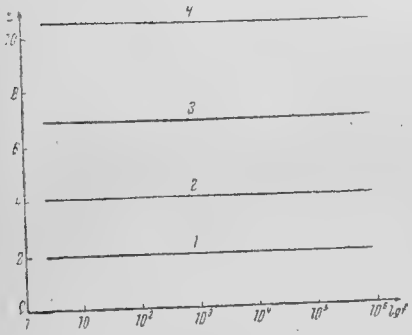


Рис. 16. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости нейтральных и ионных диэлектриков при $t=20°C$.
1—парафин; 2—сера; 3—ультрафарфор; 4—алюминоксид.

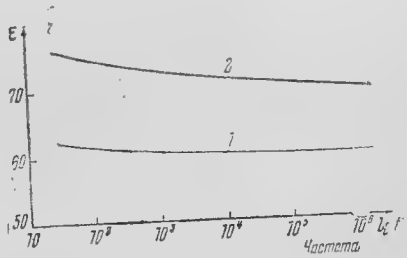


Рис. 17. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости ионных диэлектриков со структурной поляризацией при $t=20°C$.
1—изоляторный фарфор;
2—борно-щелочное стекло.

ты для технического стекла, изоляторного фарфора и тиконда. Как видно из графиков, тиконд, отличающийся от-

рицательной температурной зависимостью ε, имеет частотную зависимость качественно такую же, как керамические материалы с положительной температурной зависимостью ε.

Для дипольных диэлектриков зависимость ε от частоты имеет характер, представленный на рис. 19. Пока частота

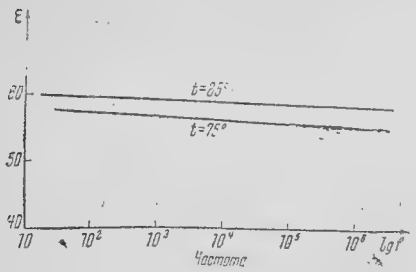


Рис. 18. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости тиконда при разных температурах.

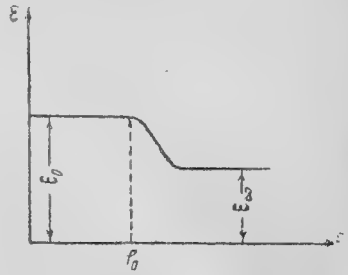


Рис. 19. Зависимость ε от частоты для дипольной жидкости.

настолько мала, что диполи успевают следовать за полем, ε велика и близка к значению ε, определенной при постоянном токе. Когда же частота становится настолько большой, что молекулы уже не успевают ориентироваться за полем, диэлектрическая проницаемость уменьшается и значение ее приближается к $\varepsilon = n_D{}^2$. Так например, диэлектрическая проницаемость глицерина при 15°С и при $f = 2{,}5 \cdot 10^7$ *гц* равна 52,2, а при частоте $f = 4.10^8$ *гц* равна 25,4.

Предельная частота, при которой происходит поляризация диполя на основании закона Стокса равна

$$f = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{kT}{8\pi^2\eta r^3}, \qquad (30)$$

где r — радиус молекулы,
η — коэфициент внутреннего трения,
T — абсолютная температура,
k — постоянная Больцмана,
τ — время релаксации.

При увеличении температуры кривая рис. 19 смещается в область более высоких частот.

Глава II

СКВОЗНАЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ

§ 9. Понятие о сквозной электропроводности

Электропроводность диэлектрика при постоянном напряжении определяется по сквозному току, представляющему собой необратимый установившийся процесс, сопровождаю-

щийся выделением зарядов на электродах. Особенностью электропроводности диэлектриков является не только ее характер в большинстве случаев не электронный, а ионный, но также что в первые моменты времени установившийся сквозной ток сопровождается обратимыми поляризационными токами, возникающими в результате ограниченного перемещения зарядов. Последнее обстоятельство имеет существенное значение при технических измерениях электропроводности, так как в первые минуты (а иногда и за большие промежутки времени) измеряется не только сквозной ток, а преимущественно обратимый (абсорбционный). Практическое значение имеет поляризационный ток, вызываемый ориентацией диполей и внутрислойной поляризацией. Процессы эти развиваются настолько медленно, а сама величина преходящего тока может быть столь велика, что создается впечатление о большой сквозной проводимости.

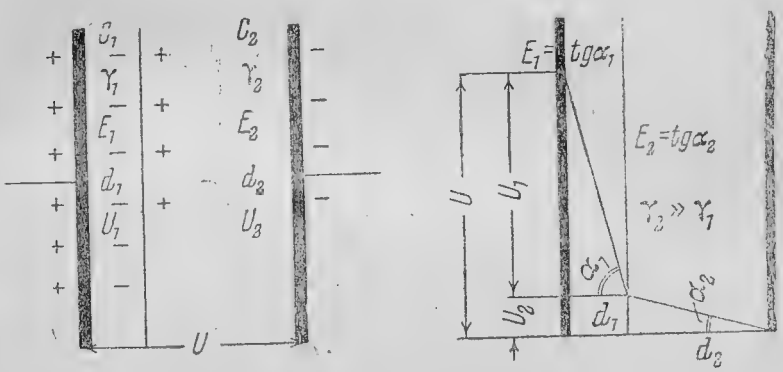


Рис. 20. Схема диэлектрика и внутрислойной поляризации. U—напряжение на обкладках конденсатора; d_1 и d_2—толщина каждого слоя; U_1 и U_2—падение напряжения на отдельных слоях; E_1 и E_2—соответствующие напряженности поля.

Явление так называемой электрической абсорбции, т. е. спадание тока с течением времени после включения диэлектрика в цепь постоянного напряжения, объясняют возникновением электродвижущей силы поляризации, направленной против приложенного напряжения.

Широкое распространение получила формула:

$$I_\tau = \frac{U}{R} P_\tau \quad , \qquad (31)$$

где U — напряжение источника тока;
I_τ — сила тока по истечении времени τ после включения образца под напряжение;
R — сопротивление образца;
P_τ — обратная электродвижущая сила поляризации.

Спадание тока в диэлектрике происходит в связи с перераспределением напряжения и образованием объемного заряда в тонком приэлектродном слое, ввиду неблагоприятных условий для обмена зарядами между диэлектриком и электродами. Под воздействием постоянного напряжения однородный диэлектрик превращается в двуслойный (в общем случае—многослойный) конденсатор с объемными зарядами в диэлектрике между электродами. На рис. 20 представлена схема диэлектрика с объемным зарядом близ одного из электродов и падение напряжения в нем. В первые моменты после включения образца под напряжение происходит накопление зарядов в приэлектродном слое, что эквивалентно зарядке конденсатора большой емкости C, которую мы и воспринимаем как „внутрислойную поляризацию". Когда этот конденсатор зарядится, ток абсорбции станет равным нулю и через двуслойный диэлектрик будет проходить только ток сквозной электропроводности.

Расчет напряженности поля производится, конечно, не на основании закона Гаусса, а на основании закона Ома, т. е. по формуле (10).

Так как количество электричества, проходящее через все слои этого конденсатора в единицу времени, постоянно, то справедливо следующее равенство:

$$\frac{Q_{\text{сквозн.}}}{\tau \cdot S} = E_1\gamma_1 = E_2\gamma_2. \qquad (32)$$

Это значит, что напряженности поля в каждом конденсаторе распределяются обратно пропорционально их электропроводностям.

Истинное сопротивление образца, определяющее величину сквозного тока при временах, когда электронная и ионная поляризации завершились, может быть вычислено по следующей формуле:

$$R_{\text{ск}} = \frac{U}{I - \Sigma I_{\text{п}}}, \qquad (33)$$

причем $\Sigma I_{\text{п}} = I_{\text{дп}} + I_{\text{мп}}$,
где U — внешняя эдс,
I — измеренное значение тока.
Составляющие $\Sigma I_{\text{п}}$ представляют сумму токов дипольной и межслойной поляризации.

Ввиду того, что определение поляризационных токов представляет значительные трудности, практически сопро-

тивление рассчитывают без их учета, как частное от деления напряжения на силу тока, обнаруженного через минуту после включения напряжения.

§ 10. Природа сквозной электропроводности

Электропроводность твердых диэлектриков обычно обусловливается передвижением возбужденных тепловой энергией ионов, так как сквозные электронные токи в большинстве технических изоляторов очень малы. При неизменной температуре и напряженности внешнего поля ниже критической происходит также электрическая очистка диэлектрика от примесных ионов. Таким образом, сквозной ток при постоянном напряжении в диэлектриках, в отличие от электронного тока в металлических проводниках, по своей природе является процессом нестационарным, уменьшающимся со временем. В этом смысле его можно называть током спадающим, имея в виду очень большие времена спадания. Степень спадания сквозного тока зависит от природы диэлектрика.

Электропроводность газов при напряжении ниже начала ударной ионизации ничтожно мала и обусловлена ионами, образовавшимися за счет действия внешних агентов (радиоактивного излучения, космических лучей и др.).

Электропроводность жидких нейтральных или слабополярных диэлектриков, как правило, является результатом наличия в них диссоциированных примесей (обычно влаги). Очистка жидкостей от примеси влаги представляет значительные трудности.

Сильнополярные жидкости проводят ток не только за счет электролитической диссоциации примесей, но и в результате диссоциации молекул основной жидкости.

В твердых диэлектриках ионного строения электропроводность обусловлена, главным образом, тепловой диссоциацией ионов, составляющих решетку. В диэлектриках с атомной или молекулярной решеткой носителями ионной электропроводности являются примеси.

Согласно определения ионной электропроводности и на основании вероятности состояния можно написать выражение:

$$\gamma = q \cdot n \cdot v = N \cdot q \cdot e^{-\frac{U_n}{\kappa T}} C e^{-\frac{U_v}{\kappa T}}, \qquad (34)$$

где q — заряд иона;

n — число свободных зарядов в $см^3$;

N — полное число ионов в 1 $см^3$;

U_n — энергия диссоциации зарядов;

v — подвижность иона;

C — предельная подвижность иона в единичном поле.

U_v — энергетическая константа;

k — постоянная Больцмана.

Объединив множители N, q, C одним коэфициентом A, мы получим выражение для электропроводности диэлектрика, в котором движутся ионы одного рода:

$$\gamma = A \cdot e^{-\frac{U_n + U_v}{kT}} = A \cdot e^{-\frac{U}{kT}}, \qquad (35)$$

где $U = U_n + U_v$; A — константа материала.

Если в диэлектрике носителями электропроводности являются разнородные ионы, то выражение (35) будет иметь вид:

$$\gamma = \Sigma_i A_i e^{-\frac{U_i}{kT}}. \qquad (35а)$$

Коэфициент A для твердых ионных диэлектриков по Френкелю определяется следующим образом:

$$A = \nu \frac{nq^2 \delta^2}{6kT},$$

где δ — среднее перемещение иона в междурешоточном пространстве;

k — постоянная Больцмана;

ν — частота собственных колебаний иона.

Зависимость удельного объемного сопротивления (величины обратной удельной электропроводности) от температуры имеет вид:

$$\rho = C \cdot e^{\frac{B}{T}}; \qquad (36)$$

B и C — постоянные, характерные для данного материала.

Приведенная формула справедлива для расчета электропроводности твердых и жидких диэлектриков в общем случае. Для твердых диэлектриков наклон кривой электропроводности обусловлен в основном температурным коэфициентом энергии диссоциации зарядов, в случае жидких диэлектриков заметное значение имеет температурный коэфициент подвижности (за счет изменения вязкости, радиуса сольватных оболочек, ассоциации и агрегации).

На рисунке 21 показана температурная зависимость удельного объемного сопротивления для каменной соли, а на рисунке 22 — температурная зависимость удельного сопротивления в логарифмическом масштабе для ряда неор-

ганических диэлектриков. Как следует из рисунка 22, удельное объемное сопротивление особенно резко изменяется в области низких температур. Так например, в диапазоне 13—227°С ρ_v щелочного стекла изменяется на четыре степенных знака, а в диапазоне 127—227° ρ_v изменение составляет лишь два степенных знака.

Выражение для электропроводности позволяет оценить количество свободных ионов, приходящееся на полное число ионов в 1 $см^3$ кристалла, которое можно положить равным $N \simeq 10^{22}$.

Об энергии кристаллической решетки твердого

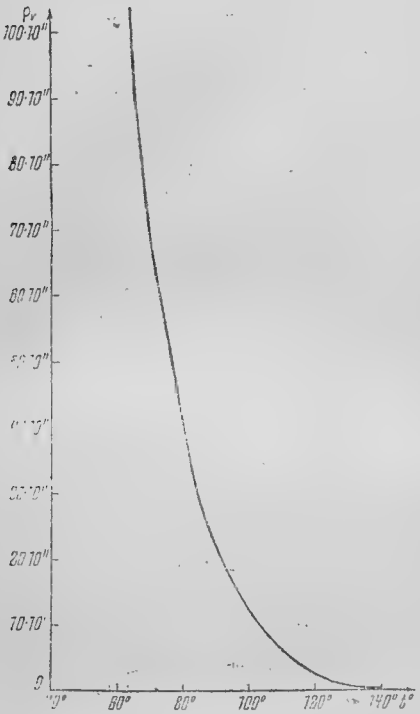


Рис. 21. Зависимость удельного сопротивления каменной соли от температуры.

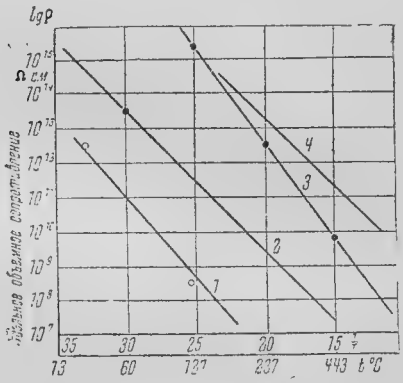


Рис. 22. Зависимость удельного объемного сопротивления от температуры (в логарифмическом масштабе) для некоторых стекол и кристаллов.
1 — щелочное стекло; 2 — каменная соль; 3 — кварц перпендикулярно оси; 4—свинцовое стекло.

диэлектрика судят по данным температурного хода электропроводности, причем зависимостью подвижности от температуры пренебрегают. Экспериментально определенная энергия U оказывается всегда меньше значений, которые дает теория кристаллической решетки. Обычно диэлектрик характеризуют не абсолютной величиной энергии диссоциации, а некоторым числом B, получаемым из отношения этой энергии к постоянной Больцмана. Для неорганических кристалловидных диэлектриков это отношение близко

к 10000. Константа диссоциации B может быть вычислена по формуле.

$$B = \frac{U}{k} = \frac{\Delta \ln \gamma}{\Delta \frac{1}{T}}, \qquad (37)$$

где $\Delta \ln \gamma$ — разность логарифмов электропроводности, найденная из опыта при двух каких-либо температурах, k — постоянная Больцмана ($1{,}37 \cdot 10^{-16}$ *эрг*/°*C*), $\Delta \frac{1}{T}$ — разность обратных значений температуры.

Обращает внимание замечательный факт, что энергия U решетки кристаллического диэлектрика во много раз превосходит энергию теплового движения при комнатной температуре, и тем не менее изоляторы обладают линейной зависимостью логарифма электропроводности от температуры, причем диссоциация решетки (а, следовательно, и электропроводность) обнаруживаются уже при очень низких температурах.

Для каменной соли, например, получаем:

$$U = B \cdot k = 10500 \cdot 1{,}37 \cdot 10^{-16} = 1{,}43 \cdot 10^{-12} \text{ эрг.}$$

Средняя кинетическая энергия теплового движения

$$E_t = \frac{3}{2} kT = 1{,}5 \cdot 1{,}37 \cdot 10^{-16} \cdot 293 = 6 \cdot 10^{-14} \text{ эрг.}$$

Таким образом, отношение

$$\frac{U}{E_t} = \frac{1{,}43 \cdot 10^{-12}}{6 \cdot 10^{-14}} = 24 \cdot$$

Объяснение этому факту дает само выражение электропроводности, основанное на статистике Больцмана. Диссоциацию ионов производят флюктуации теплового движения, предельные значения которых тем вероятней, чем больше величина средней кинетической энергии молекул.

Искажения в кристаллической решетке (наличие неоднородностей в ней) в свою очередь уменьшают величину энергии диссоциации ионов.

Ион, выведенный тепловым движением из положения равновесия, передвигается затем внутри кристаллической решетки, согласно представлениям А. Ф. Иоффе, путем обмена мест. В твердых диэлектриках в широкой области температур (вплоть до сотен градусов) в подавляющем большинстве случаев передвигается один какой-либо из ионов решетки. Это объясняется тем, что энергия диссоциации (а часто и энергия перемещения) для разных ионов в кристалле различна; как правило, например, более подвижными являются ионы меньшего радиуса.

Такое положение не нарушает, однако, основного условия ионной проводимости — одновременного выделения на катоде и на аноде двух противоположных зарядов. Меха-

низм электропроводности при низких температурах сводится к тому, что в момент, когда подвижный ион подходит к противоположному электроду и нейтрализуется там, неподвижные (или малоподвижные) ионы, находящиеся у другого электрода в приэлектродном слое также нейтрализуются, и во внешней цепи возникает ток. Часто носителями тока являются электроны или ионы примесей, а иногда происходит диффузия ионов с электрода в толщу диэлектрика. При высоких температурах активно участвуют в электропроводности оба противоположно заряженных иона, и прямая выражающая зависимость $\ln \gamma = f\left(\frac{1}{T}\right)$ получает другой, более крутой наклон.

§. 11 Зависимость электропроводности от напряжения

Согласно закона Ома электрическое поле только направляет и ускоряет движение имеющихся свободных зарядов, но не создает их. Область применимости закона Ома распространяется вплоть до очень высоких электрических полей (порядка $10^5 - 10^6$ *в/см*). Однако при известной, характерной для каждого диэлектрика напряженности поля, появляется зависимость числа зарядов от силы поля. Носителями электропроводности здесь оказываются электроны экспериментальных данных о зависимости ионной электропроводности от напряженности поля не имеется.

Зависимость электронной электропроводности от силы поля выражается законом Пуля

$$\gamma = \gamma_0 \cdot e^{\alpha E}, \tag{38}$$

который вместе с законом Ома составляет одно аналитическое выражение

$$\ln\gamma = \ln\gamma_0 - \frac{A}{2kT} + \frac{B}{2kT} E, \tag{39}$$

где E — напряженность поля; γ_0 — электропроводность в области независимости γ от E; A, α, B — энергетические константы; T — абсолютная температура; k — постоянная Больцмана.

При очень больших напряженностях поля, близких к пробивным значениям, оказывается более точной не формула Пуля, а формула Френкеля:

$$\gamma = \gamma_0 \cdot e^{-\frac{U_0 - 2\sqrt{\frac{qE}{\varepsilon}}}{2kT}}, \tag{40}$$

где q — заряд электрона; ε — диэлектрическая проницаемость.

Наклон прямой электропроводности $\ln\gamma = f(\sqrt{E})$, как это следует из теории Френкеля, уменьшается при увеличении абсолютной температуры.

§ 12. Электропроводность технических диэлектриков

По величине объемного сопротивления технические диэлектрики в подавляющем большинстве случаев легко удовлетворяют условиям эксплоатации. Только действие высоких температур или поглощение изолятором влаги обусловливает неудовлетворительную работу детали, как следствие низкого объемного сопротивления. При нормальных температурах вполне качественными по величине объемного сопротивления являются и изоляторный фарфор, и стекла, и многие естественные и искусственные смолы. Органические диэлектрики на основе целлюлозы, пластмассы с наполнителем при высокой влажности воздуха имеют низкое объемное сопротивление вследствие присущей им пористости

Неорганические диэлектрики — плотная керамика, стекла, микалекс, являются непористыми, и объемное сопротивление их не меняется от действия влаги. Только при разогреве в электрическом поле или внешним источником тепла приходится считаться с величиной их объемного сопротивления во избежание большой утечки тока или теплового пробоя.

В отдельных случаях технические диэлектрики например, горные породы содержат посторонние полупроводящие включения. Кроме того, большинство горных пород характеризуется очень развитой системой капилляров. Удельное объемное сопротивление этих материалов невелико и составляет лишь $10^8 - 10^9$ *ом · см*.

В таблице 2 приведены значения удельного объемного сопротивления для пористых и плотных технических диэлектриков ионного строения и с молекулярной решеткой.

Таблица 2

Удельное объемное сопротивление твердых диэлектриков в зависимости от температуры и влажности

Название материала	Особенности строения	Удельное объемное сопротивление в *ом · см*		
		при 0% относит. влажности; 20°С	при 70% отн. влажн.; 20°С	при 100°С
Мрамор	Пористые диэлектрики	$10^{14} - 10^{16}$	$10^8 - 10^{10}$	$10^{12} - 10^{14}$
Дерево		$10^{13} - 10^{14}$	$10^8 - 10^9$	$10^{12} - 10^{13}$
Фибра		$10^{13} - 10^{14}$	$10^8 - 10^9$	$10^{10} - 10^{11}$

Продолжение таблицы 2

Название материала	Особенности строения	Удельное объемное сопротивление в *ом . см*		
		при 0% относит. влажности; 20°С	при 70% отн. влажн.; 20°С	при 100°С
Стекла (щелочные)	Плотные диэлектрики с ионной решеткой	$10^{13} - 10^{14}$	$10^{13} - 10^{14}$	$10^{9} - 10^{10}$
Изоляторный фарфор . . .		$10^{14} - 10^{15}$	$10^{14} - 10^{15}$	$10^{10} - 10^{11}$
Радиофарфор . .		$10^{17} - 10^{18}$	$10^{17} - 10^{18}$	$10^{13} - 10^{14}$
Полистирол . .	Плотные диэлектрики — высокомолекулярные соединения	$10^{18} - 10^{19}$	$10^{18} - 10^{19}$	—
Парафин (чистый)		$10^{18} - 10^{19}$	$10^{18} - 10^{19}$	$10^{16} - 10^{17}$
Политен		$10^{17} - 10^{18}$	$10^{17} - 10^{18}$	$10^{16} - 10^{17}$
Бакелит		$10^{14} - 10^{15}$	$10^{14} - 10^{15}$	$10^{12} - 10^{13}$

В таблице 3 даны значения удельного объемного сопротивления слабополярных и сильнополярных жидкостей.

Таблица 3

Удельное объемное сопротивление жидких диэлектриков

Название жидкости	Особенности строения	Удельное объемное сопротивление в *ом · см*	Диэлектрическая проницаемость ε
Совол	Слабополярные	$10^{12} - 10^{13}$	4,5
Касторовое масло .		$10^{10} - 10^{14}$	4,4
Бензол		$10^{13} - 10^{14}$	2,3
Ксилол		$10^{11} - 10^{13}$	2,3 — 2,5
Трансформат. масло		$10^{12} - 10^{15}$	2,3 — 2,5
Бензин		$10^{13} - 10^{15}$	1,8 — 2
Анилин	Сильнополярные	$10^{7} - 10^{8}$	7 — 8
Ацетон		$10^{6} - 10^{7}$	21 — 22
Спирт метиловый .		$10^{6} - 10^{7}$	33
Вода очищенная .		$10^{6} - 10^{7}$	82

Глава III

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

§ 13. Общие сведения

Диэлектрическими потерями называют мощность, рассеиваемую в диэлектрике и вызывающую его нагрев при воздействии электрического поля. Диэлектрические потери наблюдаются как при переменном, так и при постоянном напряжениях, поскольку всегда может быть обнаружен сквозной ток. Однако при постоянном напряжении, когда нет периодической поляризации, вполне достаточно характеризовать диэлектрик величиной удельного сопротивления. При переменном напряжении характеризовать материал величиной эквивалентного омического сопротивления так же, как и абсолютным значением активной мощности неудобно, хотя бы вследствие того, что потери зависят от габаритов изделия. О диэлектрических потерях в материале при переменном напряжении судят по величине отношения активного тока к реактивному или по углу потерь δ в треугольнике токов, т. е. по параметрам, учитывающим все процессы, связанные с тепловыделением, и специфичным только для цепи переменного тока.

Для громадного большинства материалов потери не определяются значениями проводимости диэлектрика при постоянном токе, а являются величиной, зависящей прежде всего от частоты тока, от структуры диэлектрика и температуры. Известно, например, что янтарь, отличающийся исключительно высоким сопротивлением на постоянном токе, обнаруживает относительно большие диэлектрические потери при переменном напряжении.

С увеличением частоты реактивный ток в диэлектрике возрастает, и одновременно возрастает за счет диэлектрических потерь активная мощность (если потери не обусловлены одной сквозной электропроводностью), согласно известной формуле

$$P_a = UI\cos\varphi = U^2\omega C\operatorname{tg}\delta, \qquad (41)$$

где U—приложенное напряжение,
ω—угловая частота,
C—емкость изделия.
δ—угол диэлектрических потерь.

Требование малого угла потерь вызывается необходимостью избежать большого разогрева диэлектрика, который может привести к тепловому пробою изделия. При радиочастотах важно также возможно уменьшить затухание контура.

§ 14. О природе диэлектрических потерь

Ранее было указано, что в однородном, свободном от примесей диэлектрике, потери обусловливаются, с одной стороны, сквозным током, а с другой — активными составляющими поляризационных токов.

Практически на величине диэлектрических потерь отражаются только те перемещения связанных зарядов, которые зависят от тепловой энергии, и время релаксации которых сравнимо с периодом приложенного напряжения.

В технических изолирующих материалах, помимо потерь сквозной электропроводности и потерь замедленной поляризации, возникают дополнительные диэлектрические потери, которые в сильнейшей степени влияют на электрические свойства диэлектриков. Эти потери вызываются наличием посторонних полупроводящих примесей — влаги, окислов железа, углерода и др., содержащихся часто в совершенно ничтожных количествах в материале, а в случае высоких напряжений — ионизацией газовых включений внутри диэлектрика, особенно легко возникающей при радиочастотах.

Опыт показывает, что если в технических стеклах угол потерь в известной степени может быть предопределен на основании современных представлений о потерях в стеклообразном состоянии, то в поликристаллических диэлектриках под влиянием примесей угол потерь приобретает самые произвольные значения. Часто оказывается, что отклонения $tg\delta$ от нормальных значений тем больше, чем меньше его минимальные значения. Потери за счет примесей, ввиду их большого практического значения, будут специально рассмотрены в разделе о гигроскопичности и далее во второй части книги.

Диэлектрические потери в ионных кристаллах впервые были детально обследованы в 1934 г. Н. П. Богородицким и В. Н. Малышевым, причем ими было установлено, что в неорганических кристалловидных диэлектриках в подавляющем большинстве случаев потери обусловлены сквозной электропроводностью и по абсолютной величине чрезвычайно малы.

Сюда следует отнести монокристаллы (гипс, кальцит, каменную соль, сильвин, кварц, периклаз, слюду и др.), естественные поликристаллы (например, мрамор), кристалловидную керамику (алюминоксид). Предполагается при этом, что кристалл в достаточной степени свободен от примесей аморфной фазы и примесей полупроводников.

Потери за счет поляризации в жидком и вязком состояниях полярного диэлектрика были рассмотрены Дебаем, причем механизм этих потерь назван дипольным.

Механизм поляризационных потерь в твердых диэлектриках в основных чертах развит П. П. Кобеко и его школой, причем в этой области температур потери получили название структурных ввиду большой зависимости их от структуры вещества.

Следует подчеркнуть, что в то время, как старая дебаевская теория дипольных потерь применима только к вязкому состоянию диэлектрика, теория структурных потерь рассматривает механизм потерь за счет тепловой поляризации в самом общем виде, не проводя принципиального разграничения между твердым и вязким состояниями. Поэтому зависимости для угла потерь старой дебаевской теории вполне укладываются в выражения структурной теории потерь.

Диэлектрические потери в газообразных диэлектриках возникают в результате частичной ионизации газа (короны) в неоднородном поле. Потери на корону возрастают с повышением напряжения. Расчет диэлектрических потерь в газах на корону будет рассмотрен ниже.

§ 15. Формальная теория диэлектрических потерь

Прежде чем обратиться к частным теориям диэлектрических потерь за счет замедленной поляризации, рассмотрим общую, так называемую формальную теорию, представляющую собой математическую трактовку диэлектрических потерь за счет сквозной электропроводности и за счет поляризации в самом общем случае, т. е. независимо от агрегатного состояния диэлектрика и независимо от частоты поля.

Основное значение этой теории заключается в том, что она вне зависимости от природы потерь первая установила формальную связь между величиной угла потерь, активной и реактивной составляющими электропроводности, частотой тока в известных границах и температурой (также в известных границах). Исходным положением этой теории является возможность суперпозиции тока в диэлектрике при заданной функции спадания тока. Постоянная времени, характеризующая спадание тока со временем, для одного и того же материала в различных диапазонах частот, конечно, различна. Поэтому количественного предвычисления угла потерь в материале без экспериментального определения функции спадания тока формальная теория не позволяет сделать.

При частотах, значительно превосходящих технические, экспериментальное определение функции спадания тока представляет значительные трудности. Здесь, в области высоких частот, выражение, которое дает формальная теория

для угла потерь, можно видоизменить с таким расчетом, что вместо экспериментально измеренной функции спадания тока участвуют экспериментально измеренные предельные значения диэлектрической проницаемости.

Таким образом $\operatorname{tg}\delta$ диэлектрика определяется или по формуле

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\omega k T^2}{kT + C_0(\omega^2 T^2 + 1)}, \tag{42}$$

или, согласно выражению

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)\omega T}{\varepsilon_0 + \varepsilon_\infty \omega^2 T^2}; \tag{43}$$

здесь постоянную времени T мы полагаем равной

$$T = \frac{\varepsilon_0 + 2}{\varepsilon_\infty + 2}\tau, \tag{44}$$

k—постоянная, характеризующая электропроводность диэлектрика при переменном напряжении; ε_0 и ε_∞—диэлектрические проницаемости, определенные при постоянном токе и при очень высоких частотах, C_0—геометрическая емкость.

Какие факторы определяют постоянную времени спадания тока (или время релаксации зарядов диэлектрика), формальная теория, как было указано выше, не рассматривает.

Условия максимума $\operatorname{tg}\delta$ находим, продифференцировав выражение (42) или (43) по ω и приравняв производную нулю, имеем:

при $$\omega\tau = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_\infty}} \cdot \frac{\varepsilon_\infty + 2}{\varepsilon_0 + 2}, \tag{45}$$

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{2\varepsilon_0}\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_\infty}}. \tag{46}$$

В случае ε_0 и ε_∞, близких друг к другу, левая часть уравнения (45) равна 1 и $\omega = \frac{1}{\tau}$.

Так как постоянная времени зависит от температуры, то и температурная зависимость $\operatorname{tg}\delta$ проходит через максимум.

Для математического решения цепи переменного тока, содержащей конденсатор с диэлектрическими потерями, необходимо иметь соответствующую схему замещения, которая по своему действию будет вполне аналогична заменяемому конденсатору. Эквивалентная схема должна быть выбрана так, чтобы активная мощность, расходуемая в данной схеме, была точно равна потерям в конденсаторе и ток

был сдвинут относительно напряжения на тот же угол, как и в случае реального конденсатора. При соблюдении этих условий величина тока получится одинаковой в обоих случаях.

Поставленная задача может быть решена при замене конденсатора с потерями идеальным конденсатором с последовательно включенным омическим сопротивлением (так

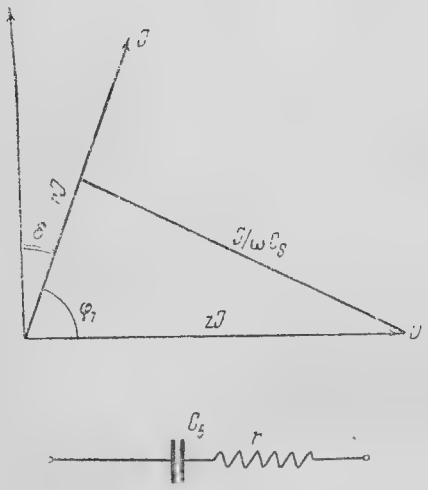


Рис. 23. Эквивалентная схема замещения реального конденсатора с последовательным включением емкости и активного сопротивления.

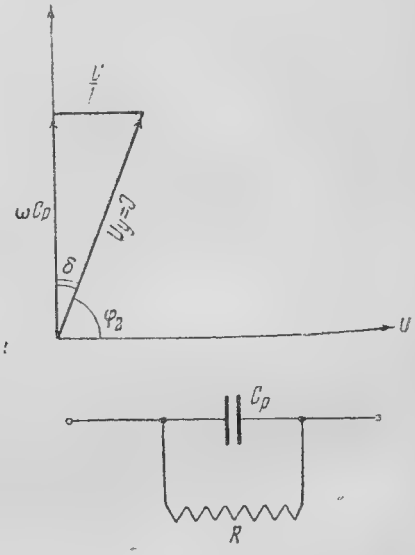


Рис. 24. Эквивалентная схема замещения реального конденсатора с параллельным включением емкости и активного сопротивления.

называемая последовательная схема) или идеальным конденсатором, шунтированным омическим сопротивлением (параллельная схема). В идеальном конденсаторе ток сдвинут относительно приложенного напряжения на угол, равный 90°, и в таком конденсаторе не наблюдается.

Указанные эквивалентные схемы, конечно, не имеют в виду толкования механизмов диэлектрических потерь и введение их нужно рассматривать только формально.

Последовательная схема представлена на рис. 23, параллельная на рис. 24. Здесь же даны диаграммы токов и напряжений. Схемы будут вполне эквивалентны, если при равенстве полных сопротивлений $Z_1=Z_2=Z$, будут равны активные и реактивные составляющие их. Это условие будет

соблюдено, если углы сдвига тока относительно напряжения $\varphi_1=\varphi_2=\varphi$ будут равны и поглощаемые мощности будут одинаковы.

Выразим мощности для параллельной и последовательной схем через величины емкостей C_s и C_p и угол δ, являющийся дополнением угла φ до 90°.

Для последовательной схемы имеем:

$$P=UI\cdot\cos\varphi=\frac{U\cdot U\cdot r}{zz}=\frac{U^2r}{x^2+r^2}=\frac{U^2r}{x^2\left(1+\frac{r^2}{x^2}\right)}=\frac{U^2\omega C_s\operatorname{tg}}{1+\operatorname{tg}^2\delta}, \quad (47)$$

$$\operatorname{tg}\delta=\omega C_s r; \quad (48)$$

для параллельной схемы:

$$P=UI\cdot\cos\varphi=\frac{UUy\cdot g}{y}=U^2g=U^2b\operatorname{tg}\delta=U^2\omega C_p\operatorname{tg}\delta, \quad (49)$$

$$\operatorname{tg}\delta=\frac{1}{R\cdot\omega C_p}. \quad (50)$$

Приравнивая выражения (47) и (49), а также (48) и (50), найдем соотношения между C_p и C_s и между r и R

$$C_p=\frac{C_s}{1+\operatorname{tg}^2\delta} \quad (51)$$

$$R=r\left(1+\frac{1}{\operatorname{tg}^2\delta}\right). \quad (52)$$

Для хороших диэлектриков можно пренебречь $\operatorname{tg}^2\delta$ в выражении (51) и считать $C_p\cong C_s\cong C$. Выражения для мощности, рассеиваемой в диэлектрике, в этом случае будут также одинаковы для обеих схем

$$P=U^2\omega C\operatorname{tg}\delta.$$

Сопротивление R в параллельной схеме, как следует из выражения (52), во много раз больше сопротивления r.

Выражение для удельных диэлектрических потерь, т. е. потерь 1 $см^3$ вещества имеет вид:

$$P=\frac{\varepsilon\omega\operatorname{tg}\delta}{4\pi\cdot 9\cdot 10^{11}}\left(\frac{U}{d}\right)^2=\frac{\varepsilon f\operatorname{tg}\delta}{1{,}8\cdot 10^{12}}\left(\frac{U}{d}\right)^2, \quad (53)$$

где P—удельные потери;
$\omega=2\pi f$—угловая частота;
U—напряжение;
d—толщина образца.

Так как емкость кубика $C = \frac{\varepsilon}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^{11}}$ фарады, — реактивная составляющая электропроводности

$$\gamma_c = \frac{\varepsilon f}{1{,}8 \cdot 10^{12}}, \tag{54}$$

активная составляющая

$$\gamma_a = \frac{\varepsilon f \operatorname{tg}\delta}{1{,}8 \cdot 10^{12}}, \tag{55}$$

полная удельная электропроводность

$$\gamma = \gamma_a + i\gamma_c = \frac{\varepsilon f}{1{,}8 \cdot 10^{12}}\left(\operatorname{tg}\delta + i \right). \tag{56}$$

В тех случаях, когда механизм диэлектрических потерь при переменном напряжении сводится только к сквозной электропроводности (например, для очень качественных диэлектриков, таких, как каменная соль, сильвин), а также в обратном случае, при очень большой электропроводности материалов (например, при высоких температурах), активная электропроводность не зависит от частоты, и $\operatorname{tg}\delta$, согласно формулы (55), оказывается обратно пропорциональным частоте.

§ 16. О выборе эквивалентной схемы диэлектрика

Следует обратить внимание на то, что при переменном напряжении, в отличие от постоянного тока, емкость диэлектрика с большими потерями становится совершенно условной величиной, в зависимости от выбора той или иной эквивалентной схемы. Отсюда и диэлектрическая проницаемость материала с большими потерями при переменном напряжении также условна. Угол потерь от выбора схемы, конечно, не зависит.

В качестве примера приведем значения ε для некоторых материалов:

Значения диэлектрической проницаемости:

	Для бакелитовой плиты (увлажнен.)	Для влажной кабельной бумаги
$\operatorname{tg}\delta$ при $f = 50$ *гц*	0,660	0,350
ε = по последоват. схеме . .	28	4,8
ε = по параллельной схеме .	18	4,3

Определив каким-либо методом при некоторой частоте тока параметры эквивалентной схемы исследуемого диэлектрика (C_p и R или C_s и r), в общем случае нельзя считать полученные значения емкости и сопротивления присущими данному конденсатору и пользоваться этими данными для расчета угла потерь при другой частоте. Такой расчет может быть сделан только в том случае, если эквивалентная схема имеет физическое обоснование. Так, например, если известно для данного диэлектрика, что потери в нем определяются только потерями проводимости в широком диапазоне частот, то угол потерь конденсатора с таким диэлектриком может быть вычислен для любой частоты, лежащей в указанном выше диапазоне, по формуле

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1}{\omega CR},$$

где C и R—постоянные, измеренные при какой-нибудь частоте. Потери в таком конденсаторе, как легко видеть, не зависят от частоты и определяются выражением $P = \frac{U^2}{R}$.

Наоборот, если потери в конденсаторе обусловливаются главным образом сопротивлением подводящих и соединительных проводов, а также сопротивлением самих пластин (например, тонкая фольга в слюдяном конденсаторе), то рассеиваемая мощность в таком конденсаторе будет возрастать с частотой пропорционально квадрату частоты

$$P = U^2\omega C\operatorname{tg}\delta \cong U^2\omega C\omega C_r = U^2\omega^2 C^2 r. \qquad (57)$$

Из последнего выражения можно сделать весьма важный практический вывод: конденсаторы, предназначенные для работы на высокой частоте, должны иметь по возможности малое омическое сопротивление как пластин, так и соединительных проводов и переходных контактов.

В большинстве случаев потери в конденсаторе не могут быть объяснены ни первым, ни вторым фактором из выше приведенных, и тогда, как уже указывалось, необходимо произвести определение параметров конденсатора в тех условиях, в которых конденсатор будет работать, а именно, при заданной частоте, температуре и влажности.

§ 17. Расчет угла потерь системы конденсаторов

Если два конденсатора включены параллельно, причем известны емкость и угол потерь каждого из этих конденсаторов, то можно очень просто и совершенно точно, не делая никакаких допущений, определить результирующий

угол потерь. В качестве эквивалентной схемы каждого из этих конденсаторов должна быть принята параллельная схема. Решив схему рис. 25 относительно мощности, получим нужное нам выражение для tgδ,

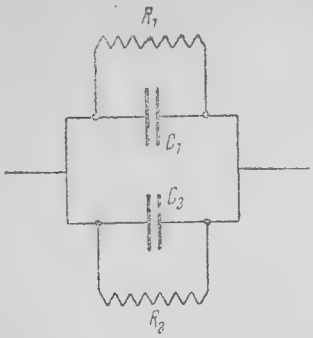


Рис. 25. Параллельное включение двух конденсаторов.

$$P_p = U^2\omega C_1 \operatorname{tg}\delta_1 + U^2\omega C_2 \operatorname{tg}\delta_2 = \\ = U^2\omega(C_1 + C_2)\operatorname{tg}\delta$$

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\operatorname{tg}\delta_1 C_1 + \operatorname{tg}\delta_2 C_2}{C_1 + C_2}. \qquad (58)$$

Если конденсаторы включены последовательно, то простое выражение для результирующего угла потерь может быть получено лишь при малых значениях tgδ составляющих конденсаторов, когда распределение напряжений относится только за счет емкостных сопротивлений.

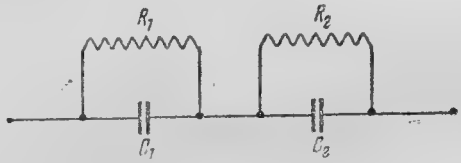


Рис. 26. Последовательное включение двух конденсаторов.

Решим схему рисунка 26, имея в виду малые значения $\operatorname{tg}\delta_1$ и $\operatorname{tg}\delta_2$.

Справедливы следующие соотношения:

$$P_s = U_1^2\omega C_1 \operatorname{tg}\delta_1 + U_2^2\omega C_2 \operatorname{tg}\delta_2 = U^2\omega\, C\operatorname{tg}\delta;$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1};$$

$$U_1 + U_2 = U;$$

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{U_1^2\omega C_1 \operatorname{tg}\delta_1 + U_2^2\omega C_2 \operatorname{tg}\delta_2}{U^2\omega C} =$$

$$= \frac{\left(\frac{C_2}{C_1+C_2}\right)^2 C_1 \operatorname{tg}\delta_1 + \left(\frac{C_1}{C_1+C_2}\right)^2 C_2 \operatorname{tg}\delta_2}{\frac{C_1 C_2}{C_1+C_2}} = \frac{C_2\operatorname{tg}\delta_1 + C_1\operatorname{tg}\delta_2}{C_1+C_2}. \qquad (59)$$

Двуслойный конденсатор, показанный на рис. 26, был выбран Вагнером в качестве одной из основных моделей

неоднородного диэлектрика. Точный расчет этой модели может быть сделан, если определить полное сопротивление цепи в комплексном виде и взять отношение вещественной части и мнимой.

Найдем выражение полного сопротивления z_a, пользуясь комплексным методом,

$$z_a = z_1 + z_2 = \frac{R_1}{1+\omega^2 C_1^2 R_1^2} + \frac{R_2}{1+\omega^2 C_2^2 R_2^2} - j\left(\frac{\omega C_1 R_1^2}{1+\omega^2 C_1^2 R_1^2} + \frac{\omega C_2 R_2^2}{1+\omega^2 C_2^2 R_2^2}\right).$$

Выражение для tgδ при этом будет иметь вид:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{R_1(1+\omega^2 C_2^2 R_2^2) + R_2(1+\omega^2 C_1^2 R_1^2)}{\omega C_1 R_1^2(1+\omega^2 C_2^2 R_2^2) + \omega C_2 R_2^2(1+\omega^2 C_1^2 R_1^2)}. \qquad (60)$$

Введем обозначения:

$$R_1 + R_2 = m$$
$$C_2^2 R_2^2 R_1 + C_1^2 R_1^2 R_2 = n$$
$$C_1 R_1^2 + C_2 R_2^2 = M$$
$$C_2^2 R_2^2 C_1 R_1^2 + C_1^2 R_1^2 C_2 R_2^2 = N,$$

тогда

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\omega^2 n + m}{\omega M + \omega^3 N}. \qquad (61)$$

Проанализируем полученное выражение. Легко видеть, что при $\omega = 0$, $\operatorname{tg}\delta = \infty$; при $\omega = \infty$, $\operatorname{tg}\delta = 0$.

Следовательно, при очень низкой частоте тока угол δ стремится к 90°, что и следует ожидать при данной схеме, а при бесконечно большой частоте преобладающее значение приобретает емкость, и угол δ стремится к 0.

Далее посмотрим, имеет ли tgδ максимум и минимум, или он изменяется монотонно. Для этого поступим обычным образом. Продифференцировав выражение (61) и приравняв производную нулю, имеем:

$$Nn\omega^4 - (Mn - 3Nm)\omega^2 + Mm = 0.$$

Легко показать, что если

$$(Mn - 3Nm)^2 - 4MNmn = \Delta > 0$$
$$Mn - 3Nm > 0,$$

tgδ будет иметь максимум и минимум:

максимум будет при $\omega = \sqrt{\dfrac{Mn - 3Nm + \sqrt{\Delta}}{2Nn}}$

минимум будет при $\omega = \sqrt{\frac{Mn - 3Nm - \sqrt{\Delta}}{2Nn}}$.

Графически изменение tgδ с частотой представлено на рис. 27. При очень низких частотах, близких к нулю, tgδ возрастает, как видно из графика, за счет сквозной электропроводности.

Теперь посмотрим, может ли tgδ (даже максимального значения) всего конденсатора быть больше, чем tgδ составляющих компонент. Для этого обратимся к векторной диаграмме, представленной на рис. 28. По оси ординат отложен вектор тока I через весь конденсатор. Падение напряжения на первом слое представлено вектором U_1, на втором —вектором U_2. Легко видеть, что результирующий угол потерь всегда будет занимать промежуточное значение между углами потерь компонент $\delta_1 < \delta < \delta_2$ и никогда не будет больше, чем наибольший из составляющих.

Продолжая далее анализ кривой $\mathrm{tg}\delta = f(\omega)$, мы видим, что при Δ равном нулю tgδ не имеет ни максимума, ни мини-

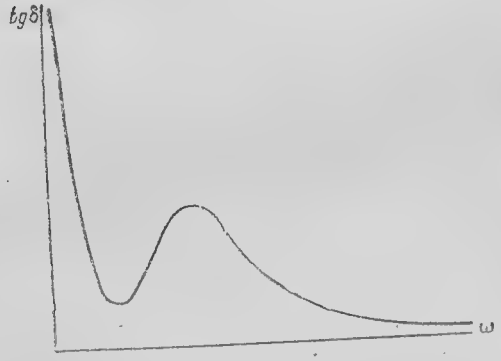


Рис. 27. Зависимость tgδ от частоты для двух конденсаторов с разными постоянными времени.

мума, а изменяется монотонно. Этот случай соответствует условию, когда $C_1R_1 = C_2R_2$, т. е. случаю, когда по Вагнеру диэлектрик не имеет „дополнительных" потерь. В этом случае углы потерь в компонентах одинаковы и, следовательно,

$$\mathrm{tg}\delta = \mathrm{tg}\delta_1 = \mathrm{tg}\delta_2 = \frac{1}{\omega C_1 R_1} = \frac{1}{\omega C_2 R_2}.$$

При увеличении частоты угол потерь в таком конденсаторе будет уменьшаться, стремясь к нулю при бесконечно большой частоте. Изменение tgδ с частотой для этого слу-

чая представлено на рис. 29. Диэлектрическая проницаемость при данных условиях не меняется с частотой.

В большинстве случаев потери в диэлектриках, как мы уже указывали выше, не могут быть объяснены потерями утечки при постоянном токе. Поэтому, если даже имеется действительно двуслойный диэлектрик, то нельзя будет предугадать его поведение при разных частотах, исходя из рассмотренной схемы. Эквивалентная схема компонент будет зависеть от частоты. Ввиду этого необходимо изучить поведение каждой компоненты отдельно, и только тогда можно будет сделать расчет сложного конденсатора по данным для составляющих компонент.

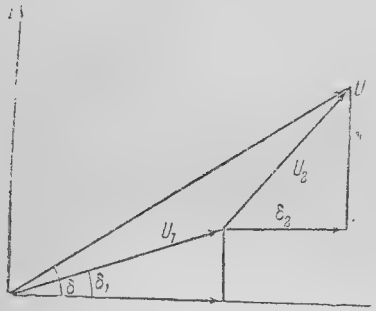


Рис. 28. Векторная диаграмма напряжений двух последовательно включенных коденсаторов.

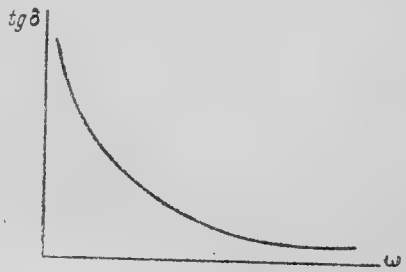


Рис. 29. Зависимость tgδ от частоты для двух конденсаторов с одинаковыми постоянными времени.

Нам кажется, что в настоящее время проще всего довольствоваться при математических расчетах простыми схемами замещения (последовательной или параллельной), не забывая только, что схемы эти совершенно формальны и требуют экспериментального определения параметров (емкости и угла потерь) в тех условиях, в которых конденсатор должен будет работать.

§ 18. Теория диэлектрических потерь при поляризации диэлектрика

Дипольная и структурная теории диэлектрических потерь рассматривают физические процессы, возникающие в диэлектрике под воздействием электрического поля—при температурах выше T_g (в случае дипольной поляризации) и ниже T_g (в случае структурной поляризации). Основные выражения для tgδ по структурной теории и старой дипольной теории одинаковы и совпадают с соотношениями формальной теории. Однако структурная теория в более общем виде интерпретирует механизм смещения и время релаксации диполя или иона, чем старая дипольная теория.

Согласно дипольной теории время релаксации выражается через коэфициент трения при вращательном движении, определяемый по Стоксу, постоянную Больцмана k и абсолютную температуру T

$$\tau = \frac{8\pi\eta r^3}{2kT}. \qquad (62)$$

Здесь η—вязкость вещества в пуазах,

r—радиус молекулы (если принять ее сферической).

Объяснение природы потерь в полярных вязких жидкостях впервые дал Китчин, основываясь на теории дипольной поляризации Дебая. Дипольные молекулы, следуя за изменением электрического поля поворачиваются в вязкой среде и вызывают потери энергии на трение. Когда вязкость среды весьма велика, молекулы почти не могут следовать за изменениями поля, и поэтому потери малы. Когда же вязкость среды очень мала, то молекулы следуют за изменением поля легко, и потери также малы.

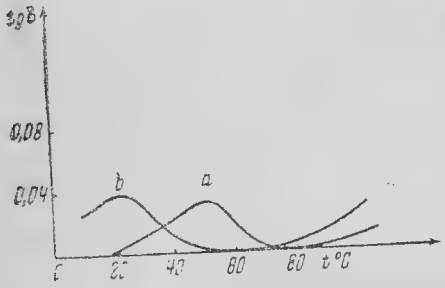


Рис. 30. Зависимость tgδ от температуры для канифольных компаундов.
a—100% канифоли; b—80% канифоли и 20% масла.

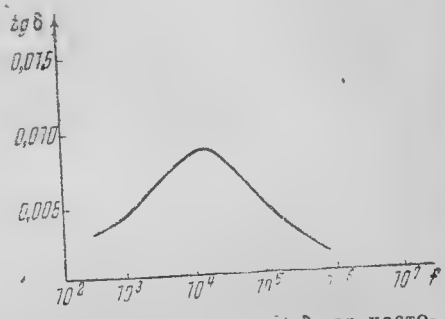


Рис. 31. Зависимость tgδ от частоты для тяжелого минерального масла при 25°С

При промежуточных значениях вязкости потери должны иметь максимум. Для смесей полярных жидкостей с неполярными зависимость tgδ от температуры аналогична, но только положение максимума и, соответственно, минимума определяются вязкостью смеси, т. е. концентрацией раствора. На рис. 30 представлены кривые зависимости tgδ от температуры для двух канифольных компаундов. На рис. 31 дана кривая зависимости tgδ от частоты для минерального масла.

Повышение tgδ при низких частотах объясняется наличием сквозной проводимости, которой и определяются потери

при очень низких частотах. Потери дипольные при низких частотах становятся меньше потерь омических. Омические потери не зависят от частоты и, следовательно, tgδ должен изменяться обратно пропорционально частоте.

Зависимость дипольных потерь от частоты представлена на рис. 32 верхней кривой. Потери возрастают с частотой до тех пор, пока диполи успевают следовать за изменением полярности поля. Когда же частота становится настолько велика, что молекулы уже не успевают следовать за изменениями поля, то потери становятся постоянными; частота возрастает, но угол поворота диполей уменьшается. Уменьшается соответственно и tgδ с частотой.

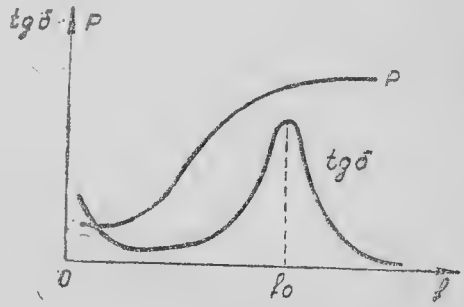


Рис. 32. Зависимость tgδ от частоты для дипольной жидкости.

При низких частотах дипольные потери при малых вязкостях незначительны и могут быть меньше потерь сквозной проводимости. Действительно, как показали Н. П. Богородицкий и И. А. Майгельдинов, потери при технической частоте для канифоли и ее компаундов при температурах, лежащих выше температуры минимума tgδ (рис. 31), обусловливаются только сквозной проводимостью и возрастают с температурой по экспоненциальному закону вида $P_t = A \cdot e^{-\frac{\alpha}{T}}$, где A — постоянная; α — температурный коэфициент сопротивления.

При радиочастотах дипольные потери даже при малой вязкости будут преобладать над омическими и, естественно, что сквозная электропроводность далеко не может определить tgδ при высокой частоте. Например, по омическому сопротивлению tgδ трансформаторного масла при $f = 1 \cdot 10^6$ *гц* должен быть равен:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\gamma \cdot 1{,}8 \cdot 10^{12}}{\varepsilon f} = \frac{10^{-12} \cdot 1{,}8 \cdot 10^{12}}{2{,}2 \cdot 1 \cdot 10^6} = 1 \cdot 10^{-6}.$$

В действительности же tgδ этого масла при $f = 1 \cdot 10^6$ *гц* равен ≅0,001. Жидкий диэлектрик, применяемый в установках высокой частоты, по возможности, не должен содержать полярных молекул.

Электрически нейтральные жидкости, не содержащие никаких посторонних примесей, могут быть отнесены к наиболее качественным диэлектрикам. Проводимость нейтральной жидкости при постоянном токе ничтожно мала ($\rho_v \geqslant 10^{15}$ *ом · см*) и диэлектрические потери в ней практически отсутствуют. К таким жидкостям можно отнести соединения, характеризующиеся строго симметричными молекулами, например, бензол (C_6H_6), четыреххлористый углерод, жидкий парафин, гексан и др. Диэлектрическая проницаемость таких жидкостей мала (не превышает 2—3), не меняется с частотой и мало изменяется с температурой. Сильнополярные жидкости—вода, спирт, ацетон, эфиры—отличаются большой электропроводностью и не могут служить изолирующим материалом. Применяемые в технике жидкие диэлектрики представляют собой или смесь нейтральных и дипольных жидкостей (трансформаторное масло, канифольные компаунды), или являются слабополярными жидкостями (скипидар, льняное масло, касторовое масло). Диэлектрические потери в таких жидкостях в значительной степени зависят от величины их вязкости. Электропроводность при постоянном токе малополярных жидкостей невелика (удельное сопротивление трансформаторного масла при комнатной температуре 10^{12}—10^{14} *ом · см* расплавленной канифоли при температуре 100° 10^{13}—10^{14} *ом . см*) и наблюдаемые диэлектрические потери при переменном токе, в особенности при высоких частотах, могут значительно превосходить омические потери. Для этих жидкостей наблюдаются характерные зависимости угла потерь и диэлектрической проницаемости от температуры. Максимум $\mathrm{tg}\delta$ лежит в той области температур, где вязкость жидкости достаточно велика; при более высокой частоте максимум $\mathrm{tg}\delta$ сдвигается в сторону меньшей вязкости и наблюдается при более высокой температуре. На рис. 33 представлены изменения $\mathrm{tg}\delta$ с температурой для канифоли при двух частотах. Минимум кривой соответствует температуре, при которой вязкость жидкости становится уже незначительной.

Теория структурных потерь исходит из представлений о неплотной упаковке аморфных тел, благодаря чему в них возникают релаксационные смещения диполей и ионов, сопровождающиеся соударениями и выделением тепла.

Слабо закрепленные ионы, занимающие определенное положение равновесия, отвечающее минимуму потенциальной энергии, под воздействием тепловой энергии и электрического поля переходят в другое равновесное состояние с несколько большей потенциальной энергией. Преодолеть энергетический барьер могут ионы, обладающие энергией большей высоты барьера, как это показано на рис. 34.

Время релаксации, согласно П. П. Кобеко, определяется, исходя из значений собственной частоты колебания диполя ν_0 и энергетических констант вещества

$$\tau_s = e^{\frac{U_b}{kT}} \cdot \frac{1}{\nu_0\left(1+e^{-\frac{U_0}{kT}}\right)} = A \cdot e^{\frac{B_s}{T}}. \qquad (63)$$

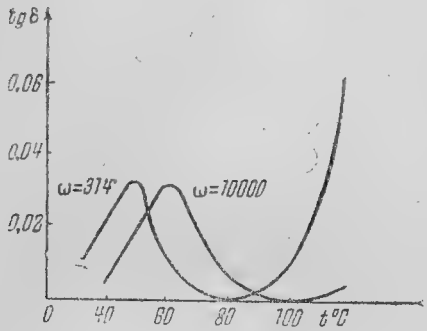


Рис. 33. Зависимость tgδ от температуры при разных частотах для канифоли.

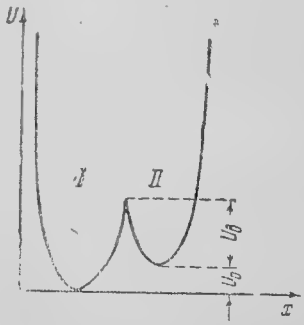


Рис. 34. Энергетические уровни диполя при структурной поляризации.

Максимум в температурной и частотной зависимостях структурных потерь наступает при частоте электрического поля $\omega \cong \frac{1}{\tau}$.

Степень заполнения минимумов потенциальной энергии и глубина этих минимумов определяют величину структурных потерь. Чем плотнее упаковка аморфного тела, тем меньше оказываются структурные потери. В предельном случае, когда стекло дает наиболее компактную упаковку атомов, диэлектрические потери его приближаются к потерям кристаллического тела.

В общем случае диэлектрические потери стекла могут рассматриваться как сумма составляющих потерь сквозной электропроводности, структурных потерь, дебаевских и низкочастотных. Для ряда диэлектриков (например, для обследованного П. П. Кобеко и Г. П. Михайловым поливинилацетата) уже обнаружены при постоянной частоте два максимума угла потерь—структурный при низких температурах, дебаевский — при высоких температурах, и участок крутовозрастающих потерь за счет сквозной электропровод-

ности. На рис. 35 показано, как складываются диэлектрические потери в этом диэлектрике.

На рисунке 36 приведена зависимость tgδ от температуры для сложного диэлектрика—бумаги, пропитанной полярным компаундом. Здесь также наблюдаются резкие максимумы угла потерь при низкой и повышенной температурах: пер-

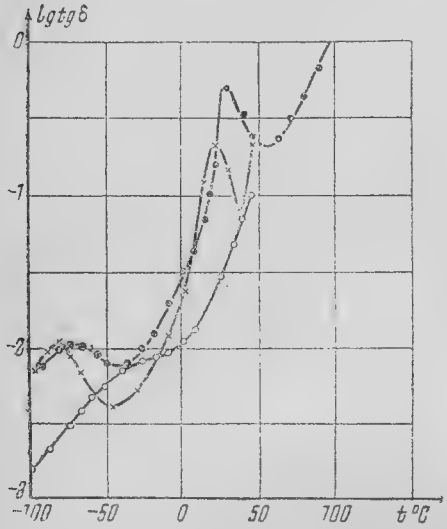


Рис. 35. Зависимость tgδ от температуры для поливинилацетата. °f=50 *гц*. °f=1,024. 10^3 *гц*; °f=6. 10^5 *гц*.

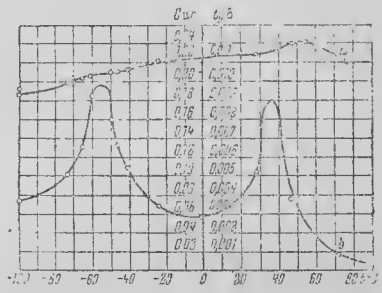


Рис. 36. Зависимость tgδ и C от температуры при f=500 *гц* конденсаторной бумаги, пропитанной компаундом (80% канифоли + 20% трансформаторного масла). *а*—$c=f(t°)$; *в*—$\mathrm{tg}\delta=f\ (t°)$.

вый—при $t\cong-60°$ за счет структурных потерь в целлюлозе, второй — при $t\cong40°$ за счет дипольных потерь в компаунде.

В неорганических стеклах при обычных температурах до сих пор не было обнаружено резкого максимума структурных потерь. Это обстоятельство в течение ряда лет приводило в недоумение многих исследователей, поскольку область независимости tgδ от частоты простирается вплоть до УКВ. Если учесть особенности структуры неорганического стекла, наличие в нем набора релаксаторов, обладающих разными, но близкими постоянными времени, — такой расплывчатый максимум не будет казаться странным.

Чем большей сквозной электропроводностью отличается стекло, тем при более низкой температуре наблюдается возрастание tgδ. Рис. 37 иллюстрирует это положение.

При высокой частоте возрастание tgδ с температурой начинается при более высоких температурах, чем при низкой

частоте. Поэтому в тех случаях, когда при высоких частотах неорганическое стекло обнаруживает tgδ, круто возрастающий при повышении температуры, уже начиная с комнатной (за счет сквозной электропроводности), — при технических частотах tgδ имеет еще большее значение. При весьма

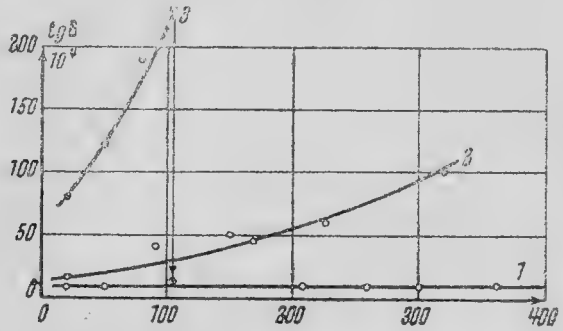


Рис. 37. 1—Стекло—чистый B_2O_3; 2—стекло 80% B_2O_3—20% K_2O; 3—стекло 69% B_2O_3—31% Na_2O ($f=2\cdot10^6$ *гц*).

низких температурах (много меньше 0°С) диэлектрические потери неорганического стекла любого состава становятся чрезвычайно малыми в том случае, если при данной частоте незаметны структурные потери. Если при высоких частотах tgδ неорганического стекла мало зависит от температуры (tgδ структурного характера), то при технической частоте угол потерь оказывается меньше, чем при высокой частоте.

Глава IV

ТЕПЛОВОЙ ПРОБОЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ

§ 19. Общие замечания

Уже давно, и совершенно справедливо, различают два механизма пробоя диэлектриков: тепловой и электрический. Оба типа пробоя сводятся к лавинообразному возрастанию электропроводности с последующим разрушением решетки. Однако в первом случае разрушение происходит вследствие термического эффекта, когда все изделие или заметная его площадь разогреваются в электрическом поле. Во втором случае термического эффекта не наблюдается, но в слабом месте при определенных напряженностях поля диэлектрик „закорачивается“ сквозным электронным током. Теория пробоя диэлектриков, так же, как и ряда других вопросов физики диэлектриков, разрабатывается уже в течение нескольких десятков лет, причем по механизму электриче-

ского пробоя имеется особенно много устаревших и неверных представлений.

Ниже мы дадим методику расчета теплового баланса изоляции, а затем рассмотрим современные взгляды на механизм электрического пробоя.

Явление теплового пробоя сводится к разогреву материала в электрическом поле до температур, соответствующих резкому изменению физико-химических свойств, расплавлению, растрескиванию, обугливанию и др., вследствие чрезмерно возросшей сквозной электропроводности или диэлектрических потерь. Величина напряжения при тепловом пробое является характеристикой не столько материала, сколько изделия, в противоположность электрическому пробою, где пробивная напряженность может служить константой материала с точки зрения электрической прочности.

Пробивное напряжение, обусловленное нагревом диэлектрика, связано с рядом условий: частотой тока, условиями охлаждения, температурой окружающей среды и другими. Кроме того, „тепловое пробивное напряжение" зависит от теплостойкости материала; органические диэлектрики, например, полистирол, имеют более низкие значения тепловых пробивных напряжений, чем неорганические—кварц, керамика, при прочих равных условиях, хотя бы только вследствие их малой теплостойкости.

При радиочастотах, в особенности при коротких волнах, размеры изолятора устанавливаются исходя из допустимой температуры нагрева диэлектрика и величины разрядного напряжения по поверхности. Что же касается напряженностей, отвечающих электрическому пробою диэлектрика, то эти величины при коротких и даже при длинных волнах обычно больше допустимых напряженностей, определяемых по нагреву. Исключением являются газообразные диэлектрики, не имеющие диэлектрических потерь и отличающиеся благодаря этому тем, что и при высоких частотах рабочие напряжения устанавливаются в них по пробивным напряжениям. Обычно же твердые диэлектрики обладают пробивными напряженностями, много большими, чем у газа.

В отдельных случаях, когда на поле высокой частоты накладывается поле постоянного высокого напряжения (условия работы анодно-разделительных конденсаторов), или когда возможны резкие увеличения амплитуды колебательного напряжения вследствие модуляции, толщина диэлектрика должна быть проверена на электрическую прочность материала, а также на величину разрядного напряжения по поверхности. Приведенные соображения показывают, что требования к материалам в отношении их пробивной напряженности в условиях, когда возникает тепловой пробой, являются совершенно неисполнимыми. В технических требова-

ниях на материалы можно указывать только значение пробивной напряженности, соответствующей электрическому пробою.

В каждом отдельном случае величина напряжения высокой частоты, приложенного к диэлектрику, устанавливается из соображений о допустимой температуре. При этом в первую очередь должны приниматься во внимание теплостойкость материала, его угол потерь и зависимость диэлектрических потерь ($tg\delta$) от температуры. В цепях переменного тока находят применение материалы с температурной зависимостью $tg\delta$, резко возрастающей уже с 20—30°С; с другой стороны, известны диэлектрики, у которых значение $tg\delta$ мало меняется в очень широком интервале температур, вплоть до 150—200°; в последнем случае тепловое пробивное напряжение будет соответствовать именно этим высоким температурам. В громадном большинстве случаев температуры нагрева выше 80—100° недопустимы. Поэтому производить расчет изолятора на пробивное напряжение для таких материалов не имеет смысла, и допустимые напряжения следует устанавливать только исходя из условий приемлемой температуры нагрева.

Строгие расчеты частных случаев теплового пробоя диэлектрика были выполнены в 1927—28 гг. В. А. Фоком и Н. Н. Семеновым. Авторы исходили из одномерного случая теплового пробоя при постоянном и переменном напряжениях. Формулы, предложенные Фоком, имеют в виду простейшие конфигурации изделий, в частности тонкие пластины или полые цилиндры с большим отношением длины к диаметру (при радиальном поле). При этом предполагается, что электроды охватывают всю площадь, нормальную к вектору потока тепла, а диэлектрические потери возрастают с температурой по известной экспоненциальной зависимости (также, как электропроводность).

Пробивное напряжение по Фоку определяется следующей формулой:

$$U_{\text{пр}} = 2E_{\text{пр}}h = \sqrt{\frac{8k}{a\gamma_0}} \cdot \frac{\beta}{\cos h\beta_0} e^{\frac{\beta \cdot tgh\,\beta_0}{c}}, \qquad (64)$$

где

$$c = \frac{k_1 \lambda h}{k(k_1 + \lambda\delta)} = \frac{\beta_0^2 + \beta_0 \cdot \sin h\,\beta_0 \cos h\,\beta_0}{(1 - \beta_0\, tg\, h\,\beta_0)\cos h^2\,\beta_0}; \quad \beta_0 = \sqrt{\frac{a\gamma_0}{2k}}\, Ehe^{\frac{a}{2}(T_m - T_0)}.$$

Формула (64) может быть представлена в более простом виде, если ввести новую переменную $\varphi(c)$, значение которой дается в специальном графике; в этом случае пробивное напряжение находим из формулы:

$$U_{\text{эфф}} = 7{,}78 \sqrt{\frac{k}{a\varepsilon_0 f tg\delta_0}} \cdot 10^6 \varphi(c) \text{ вольт}, \qquad (65)$$

где k и k_1 — коэфициенты теплопроводности материала и электродов в $\frac{кал}{см\ град\ сек}$,

a — показатель степени при экспоненциальной зависимости угла потерь от температуры,

h — толщина диэлектрика в *см*,

λ — коэфициент теплоотдачи в $\frac{кал}{см^2\ град}$,

δ — толщина электрода в *см*.

Приведенная формула не решает вопроса теплового баланса изоляции в общем случае. Например, изолятор малого сечения и большой высоты по формуле (65) совершенно не может быть рассчитан. Для такого изолятора должна быть построена своя картина теплоотдачи, на основании которой выводятся новые формулы. Случай этот был рассмотрен Е. А. Гайлишем для антенного изолятора.

Изоляторы, размеры которых по высоте соизмеримы с размерами по длине, технические изоляторы сложной конфигурации (конические вводы, юбчатые изоляторы и др.) еще не были рассчитаны на тепловое равновесие при действии высокого напряжения. Для таких изоляторов нельзя пользоваться существующими формулами. В то же время математическое решение теплового пробоя для подобных двухмерных случаев (теплоотдача по всей поверхности) наталкивается на большие трудности. Для вычисления пробивных напряжений по Фоку необходимо знать коэфициент, характеризующий рост $tg\delta$ с температурой. Между тем, как это указывалось выше, диэлектрические потери в ряде изоляторов возрастают не по экспоненциальной кривой в рабочем интервале температур. Это обстоятельство в свою очередь видоизменяет формулу.

§ 20. Тепловой расчет диэлектрика в общем случае

Нами была поставлена задача найти наиболее простой способ расчета изоляции, распространяющийся на самые разнообразные изделия. Имелось в виду охватить одним методом расчет пластин, сплошных и полых цилиндров с осевым или радиальным полем, изоляторов сложной формы (конических, ребристых, юбчатых и пр.). Различные типы высоковольтных изоляторов показаны на рис. 33.

Температура нагрева изолятора, помещенного в поле высокого напряжения, устанавливается, когда тепловыделение становится равным теплоотдаче в окружающую среду.

В большинстве случаев теплоотвод обусловливается конвекцией воздуха. Таковы условия работы подвесных, опорных изоляторов, плат воздушных конденсаторов, керамических конденсаторов, каркасов катушек индуктивности, крес-

товин и т. д. Теплоотвод за счет теплопроводности окружающей среды имеет место для кабелей, вмонтированных в стены вводов, мачтоопорных изоляторов.

Обычно расчет изолятора имеет в виду установить рабочее напряжение, которое можно приложить к изделию,

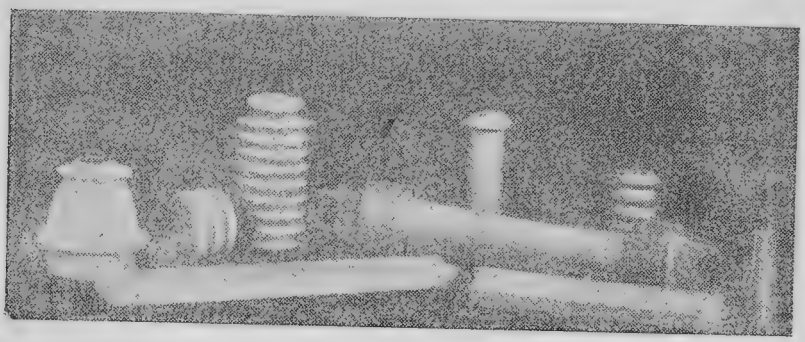


Рис. 38. Типовые высоковольтные радиоизоляторы.

причем температура нагрева не должна превосходить некоторой заданной величины.

Известно, что с увеличением приложенного напряжения возрастает реактивная мощность, что при данном tgδ вызывает рост тепловыделения и возрастание нагрева изолятора.

Чтобы температура изолятора не превзошла некоторое критическое значение, выше которого неизбежно тепловое разрушение материала, следует правильно установить допустимое напряжение. Если считать, что весь теплоперепад происходит вне диэлектрика, то рабочее напряжение можно найти, приравняв тепловыделение количеству отводимого тепла при заданной температуре поверхности изолятора, согласно формулы (66):

$$U^2 \omega C \operatorname{tg}\delta = \sigma S (t_{раб} - t_o), \qquad (66)$$

где U — напряжение в вольтах,

ω — угловая частота,

C — емкость изолятора в F,

$\operatorname{tg}\delta$ — тангенс угла потерь при рабочей температуре,

σ — коэфициент теплоотдачи в $\frac{вт}{^\circ C\, см^2}$,

S — поверхность изолятора в $см^2$,

$t_{раб}$, t_o — температуры поверхности изолятора и окружающей среды.

Формула (66) позволяет с большой точностью рассчитывать допустимое напряжение изделий с известной электрической емкостью и хорошей теплопроводностью диэлектрика, например, для керамических конденсаторов.

Несомненно, использование этой формулы для других расчетов представило бы большие удобства в виду ее простоты. Чтобы установить границы применения формулы (66), необходимо выяснить, какие теплоперепады могут быть в высокочастотных технических изоляторах, т. е. оценить значение теплопроводности, которую формула (66) не учитывает. С другой стороны, надлежит найти метод для подсчета емкостей различных изоляторов. Обычно емкость технического изолятора является величиной неопределенной. Так например, для простейшего фидерного распорного изолятора, крепление которого производится проволокой, образующей очень малую поверхность электрода на диэлектрике, рассчитывать емкость по нормальным формулам электростатики не представлялось возможным. Дальнейшие исследования показали, что для большинства практических целей формула (66) может быть применена.

Уравнение формулы (66) можно построить графически для разных температур поверхности изолятора, приняв, что $\mathrm{tg}\delta$ во всех точках изолятора одинаков. Кривая на рис. 39 представляет собой мощность, выделяющуюся в изоляторе за счет диэлектрических потерь, в зависимости от температуры; форма этой кривой определяется соответствующей зависимостью $\mathrm{tg}\delta$. Таким образом, эту кривую можно рассматривать, как $\mathrm{tg}\delta = f(t)$ в масштабе реактивной мощности изолятора при данном напряжении и частоте тока. Такое положение является справедливым, если считать, что диэлектрическая проницаемость материала или, точнее, емкость изолятора не изменяется с температурой, что можно принять для практических расчетов.

Прямая b представляет зависимость теплоотвода с поверхности изолятора от температуры. Тангенс угла наклона этой прямой равен произведению поверхности изолятора и коэфициента теплоотдачи. Прямая b пересекает ось абсцисс в точке, соответствующей температуре окружающей среды t_o.

В общем случае, т. е. при стационарном, устойчивом тепловом состоянии изолятора, кривая a имеет две точки пересечения с прямой b—при так называемой „рабочей температуре“ ($t_{раб}$,) и температуре критической ($t_{кр}$). Диэлектрик, находящийся при определенном напряжении, будет нагреваться за счет диэлектрических потерь, и окончательно установившаяся температура его нагрева будет точно соответствовать $t_{раб}$. Однако в практических условиях работы изолятора возможен дополнительный нагрев диэлектрика. В случае конденсатора неизбежен нагрев за счет джоулева тепла в обкладках конденсатора; изоляторы в шкафах передатчиков могут нагреваться лучистой энергией от мощных электронных ламп; изоляторы наружных уст-

ройств могут нагреваться солнечными лучами. Наконец, проходные изоляторы мощных устройств, например, газонаполненных конденсаторов, будут дополнительно нагреваться джоулевыми потерями в металле. Если нагрев за счет указанных посторонних источников тепла доведет температуру изолятора выше критической ($t_{кр}$), то, как видно из рисунка, tgδ диэлектрика настолько увеличится, что выделяемая мощность превысит отводимое количество тепла

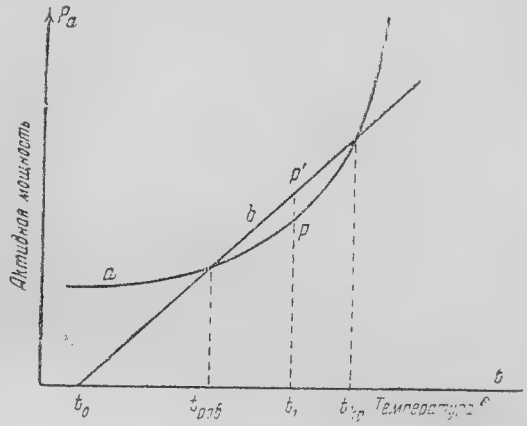


Рис. 39. Тепловыделение *(a)* и теплоотдача *(b)* изолятора.

и температура изолятора начнет беспредельно возрастать, вплоть до полного разрушения изолятора, даже если посторонний источник нагрева будет устранен. Критическая температура будет получена в том случае, когда количество тепла от постороннего источника превысит тепло, соответствующее отрезку pp' (рис. 39). Устойчивая работа изолятора может быть и при температуре выше t_1. Однако, в этом случае количество тепла от постороннего источника не должно быть больше соответствующего отрезка, заключенного между кривой выделяющейся мощности и прямой отводимого количества тепла.

Разность температур между $t_{кр}$ и $t_{раб}$ указывает на допустимый перегрев изолятора по отношению к рабочей температуре за счет внешних источников тепла. Качество различных изоляторов будет тем выше, чем больше разность $t_{кр}-t_{раб}$ при прочих равных условиях.

На рис. 40 представлены два других, возможных при неправильном расчете, изолятора тепловых состояний, уже нестационарных и неустойчивых. Кривые *a*, *b* и *c* соответствуют разным реактивным мощностям одного и того же изолятора при одинаковой частоте. Кривая *b* соответствует случаю, когда $t_{раб}$ и $t_{кр}$ совпадают, и, таким образом, изо-

лятор не имеет никакого запаса по перегреву: малейшее повышение рабочего напряжения или небольшой нагрев за счет постороннего источника тепла приведет изолятор к разрушению. Кривая *c* соответствует неправильно выбранно-

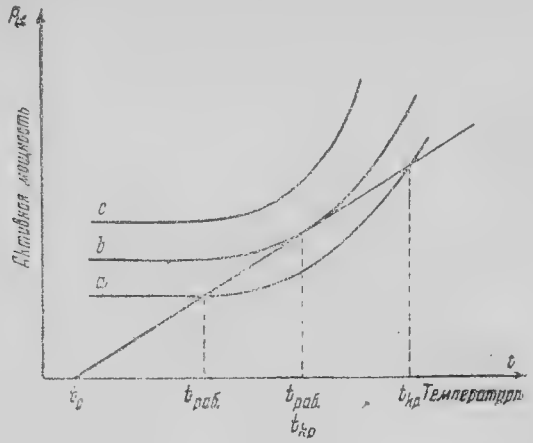


Рис. 40. Температура нагрева изолятора в зависимости от величины реактивной мощности.

му напряжению, когда данный изолятор перегружен реактивной мощностью и стационарное состояние его невозможно.

Изложенные здесь закономерности оказываются строго справедливыми, если считать, что температура, а следовательно и tgδ во всех точках изолятора постоянны. Этому условию хорошо удовлетворяют неорганические материалы: керамика, микалекс, применяемые в высоковольтных высокочастотных устройствах, и отличающиеся сравнительно высокой теплопроводностью и низкими диэлектрическими потерями. Если изолятор имеет значительную толщину, а теплопроводность и теплостойкость его малы, например, в случае органического диэлектрика, становится необходимым знать перегрев центральной части по сравнению с температурой поверхности.

Точная, но громоздкая и трудная для оперативного использования, формула (64) имеет в виду только элементарный случай включения диэлектрика. Переход от этих идеализированных случаев к реальным изоляторам связан с такими допущениями (главным образом, в отношении эффективной емкости и поверхности охлаждения), которые часто совершенно элиминируют какую бы ни было точность расчета.

Между тем тепловой баланс изоляторов может быть очень просто рассчитан в каждом отдельном случае с уче-

том теплоперепада по толщине, если рассчитать или экспериментально определить емкость изолятора, а затем, зная температурную зависимость tgδ, графоаналитически решить поставленную задачу.

§ 21. Тепловой расчет стержневого изолятора

Возьмем в качестве примера стержневой цилиндрический изолятор, показанный на рис. 38, с диаметром $2r$ и расстоянием между электродами l. Определим величину перепада температуры от поверхности до его продольной оси.

Температура поверхности изолятора определится из условия теплового баланса в поверхностном слое изолятора, которое нам дает уравнение формулы (66)

$$\frac{U^2\,\omega\varepsilon\pi r^2\,\mathrm{tg}\delta_i}{Col}=\sigma\cdot 2\pi\cdot rl(t_{\text{пов}}-t_0),$$

где $Co=4\pi\cdot 9\cdot 10^{11}$.

Обозначим выражение

$$\frac{U^2\,\omega\,\mathrm{tg}\delta_i}{Col^2}=p,$$

здесь $\mathrm{tg}\delta_i$—тангенс угла потерь стержневого изолятора, принимаемый в некотором участке температур неизменным

отсюда:
$$t_{\text{пов}}=\frac{pr}{2\sigma}+t_0. \tag{67}$$

Чтобы определить температуру в центральной части изолятора, воспользуемся законом Био-Фурье для теплопередачи. Согласно этому закону составляем уравнение:

$$Q=-kS\frac{dt}{dl},$$

тогда
$$\frac{U^2\,\omega\varepsilon\cdot\mathrm{tg}\delta\cdot\pi r^2}{Col}=-2k\pi rl\frac{dt}{dr};\ prdr=-2kdt;$$

$$\int_{t_{\text{пов}}}^{t_{\text{макс}}}dt=\frac{p}{2k}\int_{r_i=0.}^{r_i=r}rdr. \tag{68}$$

После интегрирования получаем:

$$t_{\text{макс}}-t_{\text{пов}}=\frac{pr^2}{4k}, \tag{69}$$

$$t_{\text{макс}}-t_0=p\left(\frac{r}{2\sigma}+\frac{r^2}{4k}\right). \tag{70}$$

Если температура окружающей среды равна нулю, то

$$t_{\text{макс}} = \frac{pr}{2\sigma}\left(1+\frac{\sigma r}{2k}\right) = t_{\text{пов}}\left(1+\frac{\sigma r}{2k}\right). \qquad (71)$$

Распределение температуры по сечению изолятора можно найти, решив уравнение (68) относительно некоторого, произвольно взятого радиуса r_i

$$t_i - t_{\text{пов}} = \frac{p}{2k}\left(\frac{r^2}{2}-\frac{r_i^2}{2}\right) = \frac{p}{4k}(r^2-r_i^2):$$

отсюда:

$$ti = \frac{p}{4k}\left(r^2-r_i^2\right)+\frac{pr}{2\sigma} = \frac{pr}{2\sigma}\left[1+\frac{\sigma(r^2-r_i^2)}{2kr}\right]. \qquad (72)$$

Выразим графически полученные соотношения. Для этого строим зависимость $\mathrm{tg}\delta$ от температуры для данного диэлектрика, но выбираем масштаб таким образом, чтобы по оси ординат получить активную мощность P (рис. 41). Температура поверхности изолятора определится, если из t_0 провести прямую с углом наклона α_σ до пересечения с кривой активной мощности; $\mathrm{tg}\alpha_\sigma$, как следует из формулы (67), равен $\frac{2\sigma}{r}$.

Далее из $t_{\text{пов.}}$ проведем прямую с углом наклона α_k также до пересечения с кривой активной мощности; $\mathrm{tg}\alpha_k$, согласно формуле (69), равен $\frac{4k}{r^2}$. Таким образом получим температуру на оси изолятора $t_{\text{макс}}$. Тангенс угла наклона прямой, проведенной из t_0 в точку $P_{\text{раб}}$, равняется, как следует из формулы (70), $\frac{4\sigma\cdot k}{2kr+\sigma r^2}$.

При помощи формулы (70), задаваясь температурой t_m в центре изолятора, определяем допустимое рабочее напряжение:

$$p = \frac{U^2\omega\varepsilon\mathrm{tg}\delta}{\mathrm{Col}^2} = (t_m - t_0)\ \mathrm{tg}\alpha_{\sigma k},$$

$$U_{\text{раб}} = \sqrt{\frac{\mathrm{Col}^2(t_m-t_0)\mathrm{tg}\alpha_{\sigma k}}{\omega\varepsilon\mathrm{tg}\delta_i}} = 6{,}8\cdot 10^6\, l\sqrt{\frac{(t_m-t_0)\cdot k\cdot\sigma}{\omega\varepsilon\mathrm{tg}\delta_i r(r\sigma+2k)}}. \qquad (73)$$

Значение пробивного напряжения $U_{пр}$ для данного изолятора будет найдено, если в формулу (73) вместо t_m подставить температуру $t_{кр}$ из графика $\text{tg}\delta = f(t^\circ)$.

Величину допустимого напряжения следует определять на основании tgδ в центре изолятора.

Если стержневой изолятор имеет диаметр $D = 40$ мм, длину $l = 250$ *мм*, коэфициент теплопроводности $k = 0{,}01 \frac{вт}{^\circ C\ см}$, коэфициент теплоотдачи при горизонтальном закреплении $\alpha = 0{,}001 \frac{вт}{^\circ C см^2}$ и к нему приложено колебательное напряжение $U = 10$ *кв* с частотой $f = 1{,}76 \cdot 10^7$ *гц*, а tg δ изменяется

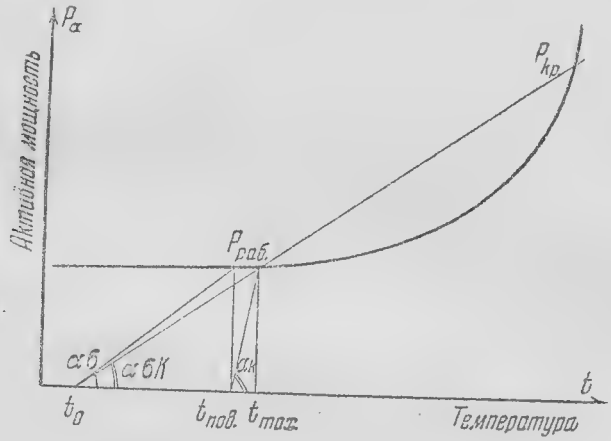


Рис. 41. Определение допустимого напряжения по температуре в центре изолятора.

согласно кривой, приведенной на рис. 41, то температура на поверхности и в центре определится формулами (67) и (69)

$$t_{пов} = \frac{pr}{2\sigma} = \frac{p \cdot 2{,}0}{2 \cdot 1 \cdot 10^{-3}};\quad p = \frac{U^2 \omega \varepsilon \text{tg}\delta}{Col^2} = \frac{U^2 кв\, \varepsilon \text{tg}\delta}{l^2 \lambda_м} \left[\frac{10^6 \cdot 2\pi \cdot 3 \cdot 10^8}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^{11}} \right]$$

$$p = \frac{100 \cdot 6 \cdot 0{,}003}{25^2 \cdot 17} \frac{1000}{6} = 0{,}0266\ вт\ в\ см^3.$$

$$t_{пов} = \frac{2{,}0 \cdot 0{,}0266}{2 \cdot 0{,}001} = 26{,}5^0$$

Разность температуры оси изолятора и его поверхности вычисляем по формуле (71)

$$\Delta t = t_{\text{пов}} \frac{\sigma \cdot r}{2k} = 2{,}5^{\circ}.$$

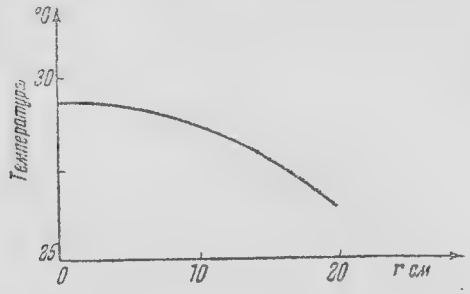


Рис. 42. Распределение температуры по сечению антенного стержневого изолятора.

На рис. 42 показано распределение температуры по сечению изолятора согласно формулы (72).

§ 22. Тепловые расчеты типовых изоляторов

Также можно установить значение теплопроводности материала при расчете рабочих напряжений изоляторов любойдругой формы, например, полых стержней, пластин и т. п.

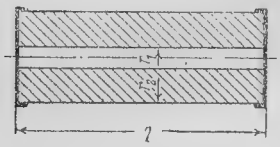


Рис. 43. Трубчатый изолятор.

Рассчитаем стержневой трубчатый изолятор, у которого электрическое поле направлено вдоль оси (рис. 43).

Определим температуру внешней поверхности

$$\frac{U^2 \omega \varepsilon \pi \, (r_2^2 - r_1^2) \cdot \operatorname{tg}\delta}{Col^2} = \sigma \cdot 2\pi r_2 (t_{\text{пов}} - t_0),$$

где $Co = 4\pi \cdot 9 \cdot 10^{11}$.

Положив

$$p = \frac{U^2 \omega \varepsilon \operatorname{tg}\delta}{Col^2},$$

имеем

$$t_{\text{пов}} - t_0 = \frac{(r_2^2 - r_1^2) \cdot p}{2\sigma \cdot r_2}.$$

Составляем уравнение для теплопередачи

$$p\,(r_n^2 - r_1^2) = -\frac{2kr_n dt}{dr_n},$$

$$dt = -\left(\frac{pr_n^2 dr_n}{2kr_n} - \frac{pr_1^2 dr_n}{2kr_n}\right) = -\left(\frac{pr_n dr_n}{2k} - \frac{pr_1 dr_n}{2kr_n}\right);$$

$$t_m - t_{\text{пов}} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{pr_n dr_n}{2k} - \int_{r_1}^{r_2} \frac{pr_1^2 dr_n}{2kr_n} = \frac{p}{2k}\left(\frac{r_2^2}{2} - \frac{r_1^2}{2}\right) - \frac{pr_1^2 \ln \frac{r_2}{r_1}}{2k};$$

$$t_m - t_0 - \frac{p(r_2^2 - r_1^2)}{2\sigma \cdot r_2} = \frac{p(r_2^2 - r_1^2)}{4k} - \frac{pr_1^2}{2k} \ln \frac{r_2}{r_1};$$

$$t_m - t_0 = p\left(\frac{r_2^2 - r_1^2}{4k} + \frac{r_1^2 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}{2k} + \frac{r_2^2 - r_1^2}{2\sigma r^2}\right).$$

Отсюда определяется допустимое рабочее напряжение полого стержневого изолятора:

$$U = 6{,}8 \cdot 10^6 l \cdot \sqrt{\frac{(t_m - t_0) k \sigma r_2}{\omega \varepsilon \operatorname{tg}\delta \left[(r_2^2 - r_1^2)\sigma r_2 + 2r_1^2 \sigma r_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + 2k(r_2^2 - r_1^2)\right]_0}}.$$

Расчет полого проходного изолятора с радиальным электрическим полем и отношением внешнего и внутреннего радиусов $\frac{r_2}{r_1}$ выполняется в той же последовательности.

Предполагая, что рассеяние энергии происходит только снаружи, составляем тепловой баланс внешней поверхности изолятора

$$\frac{U^2 \omega \varepsilon \operatorname{tg}\delta_i}{9 \cdot 10^{11} \cdot 2 \ln \frac{r_2}{r_1}} = \sigma 2\pi r_2 (t_{\text{пов}} - t_0).$$

Положив

$$p = \frac{U^2 \omega \varepsilon \operatorname{tg}\delta_i}{9 \cdot 10^{11} \cdot 2 \ln \frac{r_2}{r_1}},$$

имеем

$$t_{\text{пов}} - t_0 = \frac{p}{\sigma \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_2}.$$

Затем составляем уравнение для теплопередачи:

$$\frac{p \ln \frac{r_n}{r_1}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = -k \cdot 2\pi r_n \frac{dt}{dr_n}; \quad dt = -\frac{p \ln \frac{r_n}{r_1} dr_n}{\ln \frac{r_2}{r_1} k 2\pi r_n},$$

тогда

$$t_m - t_{\text{пов}} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{p \cdot \ln r_1 dr_n}{2\pi \cdot k \ln \frac{r_2}{r_1} r_n} - \int_{r_1}^{r_n} \frac{p \cdot \ln r_n dr_n}{2\pi \cdot k \ln \frac{r_2}{r_1} r_n},$$

$$t_m - t_{\text{пов}} = \frac{p}{4\pi k \ln \frac{r_2}{r_1}} (\ln^2 r_2 - 2\ln r_1 \ln r_2 + \ln^2 r_1).$$

Перегрев изолятора по отношению к окружающей температуре будет равняться

$$t_{\text{макс}} - t_0 = p \left(\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{4\pi k} + \frac{1}{2\pi \alpha r_2} \right).$$

Легко убедиться, что в случае очень интенсивного охлаждения, когда коэфициент теплопроводности $\sigma \simeq \infty$ (практически это может быть осуществлено, если изолятор охлаждается потоком жидкости), рабочее напряжение имеет предельно высокое значение, независящее от размеров изделия, если толщина его не слишком мала.

При идеальном охлаждении

$$t_{\text{макс}} - t_0 = \frac{U^2 \omega \varepsilon \operatorname{tg}\delta}{9 \cdot 10^{11} \cdot 8\pi k},$$

$$U_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{8\pi \cdot 9 \cdot 10^{11} k (t_{\text{кр}} - t_0)}{\omega \varepsilon \cdot \operatorname{tg}\delta_i}}. \qquad (74)$$

Как было ранее показано, перепад температуры по сечению керамического изолятора диаметром 40 *мм* составляет всего лишь 2,5°. Если иметь в виду, что применяемые в высоковольтных устройствах детали — крепежные платы, крестовины, панели, — имеют толщину, не превосходящую обычно 15—20 *мм*, то, конечно, нет смысла считаться с перепадом температур в этих изоляторах. Разность температур поверхности и центральной зоны будет там ничтожно мала.

Из формулы (71) следует, что перепад температуры определяется прежде всего соотношением между коэфициентом теплоотдачи и коэфициентом теплопроводности диэлектрика. Для керамических изоляторов или для изоляторов из микалекса коэфициент теплоотдачи в обычных условиях применения деталей почти в 10 раз меньше величины коэфициента теплопроводности этих материалов. Соответственно с этим и перепады температур в таких изоляторах получаются небольшие. Если с теплоперепадом приходится считать-

ся (например, для органических диэлектриков—эбонита, гетинакса, и при значительной толщине таких изоляторов), проверка температуры в центральной части и допустимой напряженности электрического поля может быть произведена на основании законов теплопередачи, как это было показано выше.

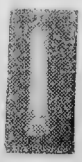
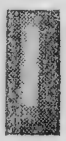
§ 23. О расчете емкости изоляторов

Для расчетов высокочастотной неорганической изоляции вполне удовлетворительные результаты дает применение наиболее простой формулы (66). Особенно целесообразно применять эту формулу для расчетов допустимых напряжений керамических конденсаторов, емкость которых является заданной величиной. Однако, в общем случае и независимо от того, как используется формула, без учета теплового градиента или с последующим расчетом этого градиента, возникает вопрос, как определять электрическую емкость. Решение этого вопроса, казалось, связано с непреодолимыми трудностями. Объяснялось это следующим: крепление токоподводящих частей на технических изоляторах производится самым разнообразным образом, причем в большинстве случаев расположение электродов не позволяет произвести расчет электрической емкости изолятора по известным формулам электростатики. Так например, в случае стержневого распорного изолятора, закрепленного проволочными обвязками, площадь соприкосновения электродов с изолятором ничтожно мала. Соответственно с этим основная емкость, т. е. емкость, образованная диэлектриком, непосредственно находящимся только между электродами, тоже будет мала. Но силовые линии будут охватывать значительный объем диэлектрика, не находящийся непосредственно под электродами. Эта краевая емкость окажется значительно больше основной емкости, между тем общей методики расчета краевой емкости не существует.

Однако при тепловых расчетах обычно нет необходимости разделять основную емкость от краевой. Для установочных высоковольтных изоляторов отношение расстояния между электродами к площади поперечного сечения выбирается настолько большим, что весь объем диэлектрика оказывается практически в одинаковой степени поляризованным, т. е. явление протекает так же, как если бы электрод распространялся на всё сечение. В таких условиях находятся, например, стержневые антенные изоляторы, опорные, многореберные изоляторы, проходные и др. Расчет емкости для всех этих изоляторов производится так, как если бы электрод распространялся по всему сечению. Исходя из этих соображений, был произведен расчет температуры нагрева ряда технических изоляторов, причем

Таблица 1

Значения температуры нагрева изоляторов

Вид изолятора	Способ крепления электродов	Условия испытания	Температура поверхности изолятора (при t окруж. среды 15° С)	
			из опыта	полученная расчетным путем
Стержневой антенный $\varnothing$ 35 *мм* Длина $l = 250$ *мм* Материал радиофарфор.	Проволочные обвязки (касание в трех точках)	Напряжение $U = 9$ *кв.* Длина волны $\lambda = 17$ *м.* $\mathrm{tg}\delta = 0{,}0030$ Диэл. проницаемость $\varepsilon = 6$, коэфициент теплоотдачи $\sigma = 0{,}001$ Расстояние между электродами $h = 200$ *мм*	36	38
	Обкатка фольгой (соприкасание всей поверхности концов изолятора с электродом) 		37	
Крепежная планка Размеры $193 \times 40 \times \times 12$ *мм* Материал-пирэфилит	Проволочные обвязки (касание в одной точке)	Напряжение $U = 6$ *кв.* Длина волны $\lambda = 17$ *м.* $\mathrm{tg}\delta = 0{,}0060$. Диэл. проницаемость $\varepsilon = 6$. Коэф. теплоотдачи $\sigma = 0{,}001$	30	34
	Обкатка фольгой (касание всей поверхности концов изолятора с электродами) 	Расстояние между электродами $h = 150$ *мм*	32	

одновременно производилась проверка путем экспериментального измерения емкости изоляторов и испытания этих изоляторов большим напряжением высокой частоты.

В проведенных расчетах коэфициент теплоотдачи σ взят 0,001 *вт*/^{0} C*см*^{2}, как среднее значение, полученное для ряда высокочастотных изделий. К сожалению, в настоящее время нет достаточных данных о коэфициентах теплоотдачи различных изоляторов. Отсутствие таких данных особенно заметно должно сказываться при практических тепловых расчетах по строгим формулам, рассмотренным в начале этой главы.

В таблице 4 приведены значения температуры нагрева, полученные расчетным путем и экспериментально для стержневых антенных изоляторов из радиофарфора и планок из пирофилита. Выдержка изоляторов под напряжением производилась до окончательного установления их температуры (1,5—2 часа). Температура поверхности измерялась при помощи термогальванометра с точностью отсчета до 0,5^0 C.

Расчет приведенных в таблице 4 значений температуры изоляторов производился при условии, что токоведущие части охватывают не только периметр изоляторов, но и все их поперечное сечение на концах. Поэтому емкость могла быть определена по обычной формуле, соответствующей случаю плоского конденсатора.

Если напряжение U выразить в *кв*, емкость C — в *см*, а коэфициент теплоотдачи σ в *вт*/^{0}C *см*^{2}, то формула (66) приобретает следующий вид:

$$t_{раб} - t_o = \Delta t \simeq 2 \cdot 10^3 \frac{U^2_{кв} \cdot \operatorname{tg}\delta \cdot C_{см}}{\lambda_м \cdot \sigma \cdot S_{см^2}}; \qquad (75)$$

где $\lambda_м$ — длина волны, выраженная в метрах,

$S_{см^2}$ — теплоотдающая поверхность изолятора,

$t_{раб}$ и t_o — соответственно температуры поверхности изолятора и окружающей среды.

Для стержневого антенного изолятора в *см*^{2}

$$C = \frac{\varepsilon S}{4\pi \cdot h} = \frac{6\pi \cdot (3{,}5)^2}{4 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 20} = 0{,}23 \ см.$$

Основная теплоотдающая поверхность его

$$S_1 = \pi \cdot D \cdot l = \pi \cdot 3{,}5 \cdot 25 = 275 \ см^2.$$

К этой поверхности добавляется поверхность торцов изолятора

$$S_2 = 2\frac{\pi d^2}{4} = \frac{2\pi (4{,}2)^2}{4} = 25 \ см^2.$$

Общая поверхность, участвующая в теплоотдаче,

$$S = 300 \text{ см}^2.$$

Для антенного изолятора из радиофарфора, рассмотренного в таблице 4,

$$\Delta t = 2 \cdot 10^3 \cdot \frac{81 \cdot 0{,}0030 \cdot 0{,}23}{17 \cdot 0{,}001 \cdot 300} = 23^0.$$

Таким образом температура этого изолятора составляет

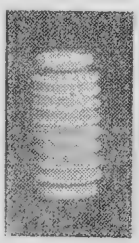
$$t_{раб} = t_o + \Delta t = 38^0\text{C}.$$

Данные таблицы 4 показывают, что значения нагрева изоляторов, полученные расчетным путем и определенные экспериментально, практически полностью совпадают. С другой стороны, из таблицы 4 следует, что температура нагрева изоляторов этого типа очень мало зависит от формы электродов, подводящих высокое напряжение. В случае проволочных обвязок, площадь соприкосновения электродов с диэлектриком в сотни раз меньше, чем в случае обкатки фольгой, между тем, температуры нагрева почти не отличаются. Объяснение этому надо искать в эффекте краевой емкости, как было отмечено раньше.

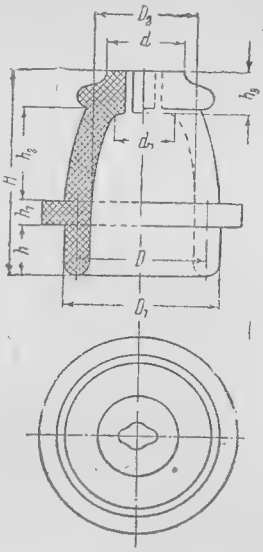
В таблице 5 приведены результаты испытания изолятора-проходного типа („колокольчик“) и опорного восьмиребер-

Таблица 5

Результаты испытания изоляторов

Вид изолятора	Способ крепления электродов	Условия испытания	Температура поверхн. изол. /при t окруж. среды 15°C/	
			из опыта	получен. расч. путем
Проходной типа ПР-4. Материал изоляторный фарфор		Напряж. U=3 *кв*, длина волны $\lambda = 17$ *м* $tg\delta = 0{,}0100$ $\varepsilon = 6{,}0$ коэф. теплоотдачи $\alpha = 0{,}001$	53°	58°
Опорный восьмиребериый. Материал изоляторный фарфор		Напряж. U=3 *кв*, длина волны $\lambda = 17$ *м* $tg\delta = 0{,}0100$ $\varepsilon = 6$ коэф. теплоотдачи $\alpha = 0{,}001$	37°	39°

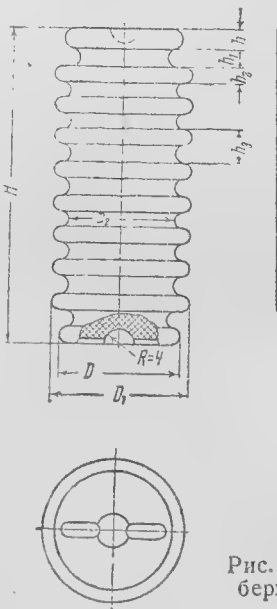
ного изолятора. Емкость этих изоляторов, а также их поверхность охлаждения рассчитывалась с известным приближением. Конический изолятор с диаметром оснований D_1 и D_2 рассматривался как цилиндрический с внешним диаметром D (рис. 44). Ребристый участок опорного изолятора при подсчете емкости был принят за сплошной цилиндр со средним диаметром D (рис. 45). Несмотря на эти допущения, расчет температуры нагрева, согласно формуле (75), дал результаты, близкие к полученным экспериментально.



Обозначения	Размеры в мм
D	70
D_2	56
d_1	30
D	63
d	25
H	90
h	25
h_1	8
h_2	45
h_3	13

Рис. 44. Проходной изолятор ПР-4.

При определении допустимых температур изоляторов с относительно малым расстоянием между электродами и когда площадь сечения их много меньше площади поперечного сечения изолятора (пластина с электродами - болтами), погрешность возрастает из-за неточного вычисления активной емкости. Чтобы уменьшить ошибку при вычислении емкости, следует строить картину силового поля, по которой устанавливать объем нагревающейся части диэлектрика. Объем диэлектрика, в котором силовые линии отличаются радиу-



Обозначения	Размеры в мм
D_1	87
D_2	47
H	130
D	54
h	10
h_1	7
h_2	8
h_3	13

Рис. 45. Восьмиреберный изолятор.

сом кривизны значительно большим, чем в центральной части, принимать в расчет не следует. Кроме того, емкость изолятора всегда может быть определена экспериментально. Таким образом даже в сложных для расчета случаях активная емкость и поверхность охлаждения определяются с достаточной для практических целей точностью.

Глава V

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ ТВЕРДЫХ И ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

§ 24. О механизме электрического пробоя

Электрический пробой — одно из наиболее сложных электрических явлений, возникающих в диэлектрике. Электрический пробой связан с самыми различными свойствами материала — электрическими, физическими со структурой, с особенностями действующего электрического поля. Ни одна из существующих теорий, в том числе и новейшие, опирающиеся на волновую механику, не в состоянии объяснить всю совокупность явлений, связанных с электрическим пробоем. Обособленным от механизма пробоя твердых и жидких диэлектриков является пробой газа, теория которого разработана теперь достаточно полно.

Развитие представлений об электрическом пробое твердых тел характеризуется тремя этапами. Первоначально возникли теории, рассматривавшие процесс пробоя как статическое явление — следствие непосредственного воздействия электрического поля на кристаллическую решетку. Сюда надо отнести теорию разрыва молекулы силами поля Роговского, а также теорию структурных дефектов Горовица. Несостоятельность этих теорий по отношению к экспериментальному материалу потребовала привлечения новых взглядов на механизм электрического пробоя, и вскоре были высказаны новые взгляды о природе пробоя, твердого тела, исходя из возможности ударной ионизации зарядов в нем. Возникновение этих ударной теорий определило второй этап в развитии физики электрического пробоя.

Наиболее стройную картину пробоя твердого тела за счет ударной ионизации дал Хиппель. Согласно последней твердый диэлектрик можно рассматривать как сильно сжатый электронный газ, в котором свободные электроны рассеивают энергию своего движения за счет возбуждения упругих колебаний в кристаллической решетке. Электроны, достигшие определенной критической скорости, производят отщепление новых электронов в решетке, причем ход процесса в этом случае зависит от кристаллографического направления.

Представления об электронном механизме электрического пробоя служат основой современных квантово-механических теорий (Зинера, Волькенштейна), где рассматривается явление электропроводности в сильном поле, приводящее к расплавлению решетки. В противоположность старым доквантовым теориям пробоя, приводившим к завышенным против экспериментальных пробивным напряжениям, современные квантовые теории дают правильный порядок величины пробивных напряжений, однако, и они не в состоянии объяснить преобладающее большинство зависимостей, наблюдающихся при пробое.

Чисто электрический пробой жидких диэлектриков, согласно утверждения ряда авторов (Семенов, Вальтер), допускается лишь в редких случаях; причиной пробоя они считают тепловые процессы. Другие теории объясняют пробой жидкостей превходящими факторами—влажностью и газовыми включениями внутри жидкости и на поверхности электродов.

Объяснение пробоя очень чистых жидкостей, где казалось бы безусловно должен иметь место электрический пробой, основанное на предположении ударной ионизации зарядов жидкости, аналогично тому, как это имеет место в газах, в настоящее время признано совершенно неубедительным.

Предполагается, что природа электрического пробоя жидкостей близка к природе пробоя твердых тел. Было также высказано мнение, что электрический пробой жидкостей возникает в результате вырывания электрическим полем электронов из металлических поверхностей электродов.

§ 25. Экспериментальные данные по электрическому пробою

Экспериментальные данные по электрическому пробою твердых и жидких диэлектриков чрезвычайно обширны и не всегда могут быть объяснены. Основными факторами, влияющими на величину пробивного напряжения, являются характер микроструктуры диэлектрика, форма электрического поля, вид напряжения.

Форма поля определяется конфигурациями электродов, и диэлектрика. Возможны искажения поля и за счет неоднородностей самого материала, например, в случае наличия в нем полостей, газовых включений. В однородном электрическом поле пробивная напряженность диэлектрика достигает предельного для данного материала значения и не зависит от толщины (пробивное напряжение возрастает линейно с увеличением толщины образца). Прак-

тически однородное поле может быть получено в очень редких случаях. Зависимость пробивной напряженности от толщины диэлектрика имеет вид, показанный на рис. 46.

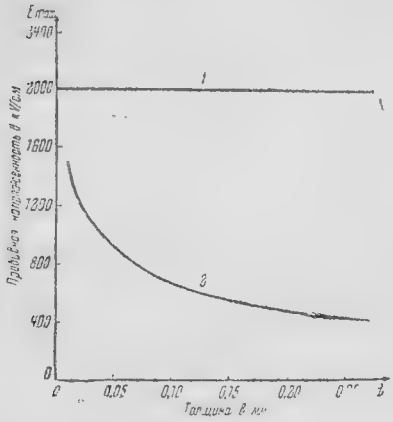


Рис. 46. Зависимость пробивной напряженности от толщины для стекла. 1—однородное поле; 2—неоднородное поле.

Чем однородней по структуре диэлектрик, тем заметнее сказывается форма поля. На рис. 47 и 48 приведены зависимости пробивных напряжений изоляторного фарфора и стекла от толщины в однородном и неоднородном полях.

Устранение краевого эффекта, т. е. повышенной напряженности у краев электродов, достигается не только выбором конфигурации изделия и электродов (утолщение краев), но и специальными способами — помещение образца в полупроводящую среду, применение полупроводящих покрытий.

Наличие краевого эффекта способствует раннему возникновению короны, в особенности при пробое диэлектри-

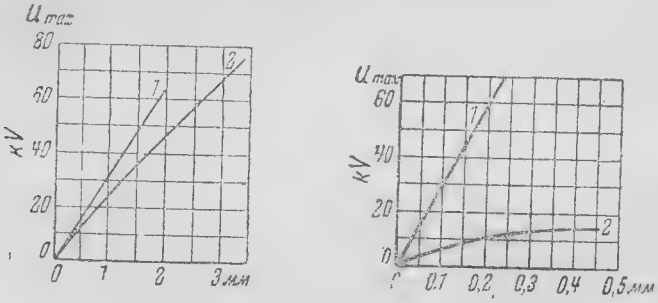


Рис. 47—48. Зависимость пробивного напряжения от толщины при 50 *гц*: 47—для изоляторного фарфора, 48—для стекла. 1—однородное поле, 2—резко неоднородное поле.

ка в воздухе. При низкой частоте в этом случае краевые разряды (корона) приводят к некоторому сглаживанию поля, и пробивные напряжения повышаются, сравнительно с пробивными напряжениями в масле. Испытание образца в среде с высокой диэлектрической проницаемостью уничтожает

краевые разряды в связи с ослаблением напряженности поля в этой среде, и диэлектрик в ряде случаев пробивается раньше, чем в воздухе. При пробое диэлектрика в трансформаторном масле, как правило, пробивные напряжения получаются более низкие, чем в воздухе, так как у края поле остается резко неоднородным.

От длительности воздействия напряжения пробивные напряжения зависят очень мало. Лишь при временах

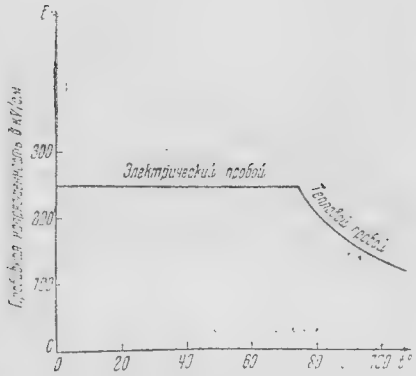


Рис. 49. Зависимость пробивной напряженности от температуры для изоляторного фарфора при f=50 *гц*.

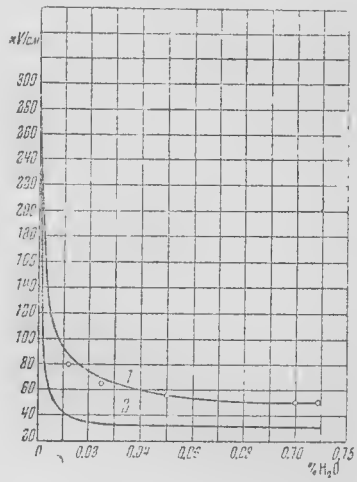


Рис. 50. Зависимость пробивной напряженности от содержания воды в масле. 1—по Лазареву; 2—по Фризе.

$\tau \simeq 10^{-4}$ *сек* и меньше (импульсы) начинается повышение напряжения. В случае возникновения краевых разрядов пробивные напряжения резко снижаются при увеличении длительности воздействия напряжения, особенно для органических диэлектриков в связи с процессами старения (химического разложения).

Характерной особенностью электрического пробоя является независимость пробивного напряжения от температуры. Рис. 49 иллюстрирует это положение.

В жидких диэлектриках характер пробоя и величина пробивного напряжения определяются содержанием примесей. В случае наличия в масле влаги пробивные напряжения резко снижаются. На рис. 50 показана зависимость пробивной напряженности трансформаторного масла от содержания в нем влаги, согласно данным Лазарева и Фризе.

Электрическая прочность твердых технических диэлектриков зависит от степени их однородности и, главным

Таблица № 6

Значения электрической прочности

Название материала	Особенности структуры	Пробивная напряженность в однородном поле при $f=50$ *гц* ($E_{эфф}$ в *кв/см*)
Стекло	Однородные плотные диэлектрики и слоистые, если поле перпендикулярно слоям	1000—2000
Каменная соль		1000—1500
Пропитанная бумага		700—1000
Слюда		2000—3000
Органические пленки (полистирол, триацетат-целлюлоза)		800—1200
Керамика	Неоднородные по структуре диэлектрики с закрытыми или тонкими сообщающимися между собой капиллярами	100—300
Пластические массы с наполнителем (монолит, карболит)		100—150
Микалекс		100—150
Мрамор	Диэлектрики с открытыми крупными порами	40—50
Дерево		40—60
Непропитанная бумага		70—100
Термокерамика		15—25
Трансформаторное масло (Неочищенное)	Жидкие диэлектрики	50—60
Трансформаторное масло (Специально очищен.)		300—400
Совол (совтол)		140÷200
Касторовое масло		120÷200
Лектронол (кремнеорганическая жидкость)		250— 300

образом, от содержания в них газовых включений. Особенно низкой электрической прочностью отличаются диэлектрики с открытыми крупными порами. Сюда относятся: мрамор, непропитанная бумага, дерево, ткани, пористая керамика и другие. Электрическая прочность этих материалов мало отличается от прочности воздуха. Диэлектрики с закрытыми или сообщающимися между собой мелкими порами, например, плотная керамика, пластмассы с наполнителями,—характеризуются более высокой электрической прочностью. Лучшими по электрической прочности являются диэлектрики плотной структуры, в том числе и слоистые, если электрическое поле направлено нормально к слоям. Сюда относятся слюда, пропитанная бумага, стекла.

В таблице 6 приведены значения электрической прочности в однородном поле для ряда технических диэлектриков.

Глава VI

ПРОБОЙ ВОЗДУХА И РАЗРЯД ПО ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКА

§ 26. Общие замечания

Воздух является обязательной изоляцией всех видов электротехнических конструкций—изоляторов, конденсаторов, трансформаторов, катушек и др.

Как известно, пробивная напряженность воздуха в обычных условиях невелика, а напряжения разряда по поверхности, как правило, еще ниже, чем пробивные напряжения, отвечающие данному промежутку воздуха. При высоких напряжениях размеры изолятора устанавливают именно из соображений о поверхностном разряде, причем одновременно значительно усложняют конфигурацию изолятора.

Такое положение относится не только к случаям постоянного напряжения или переменного промышленной частоты, но и к высокочастотным устройствам, где, казалось бы, размеры изолятора должны устанавливаться на основании тепловых расчетов.

Первые представления о пробое газа были даны Таунсендом. Его теория ударной ионизации объясняет начальные стадии пробоя, когда объемные заряды еще не имеют большого значения. Роговский и другие развили дальнейшую картину пробоя газа с точки зрения ударного действия электронов при условии усреднения потенциала, напряженности поля, плотности объемного заряда и плавного изменения параметров, характеризующих разряд, в разрядном промежутке. Современная теория стримеров Лёба и Мика базируется на новых представлениях о явлении пробоя газа. Основным процессом в этой теории является наличие в электронной лавине и особенно в ее

Таунсенд, наряду с ионизированными и обычными возбужденными частицами газа, также и частиц с энергией возбуждения большей, чем энергия ионизации, возбужденных ионов. Фотоны, излучаемые этими высоковозбужденными частицами, проникают за пределы лавины и производят фотоионизацию атомов и молекул газа.

Электрический пробой воздуха подчиняется совершенно иным законам, чем пробой твердой изоляции.

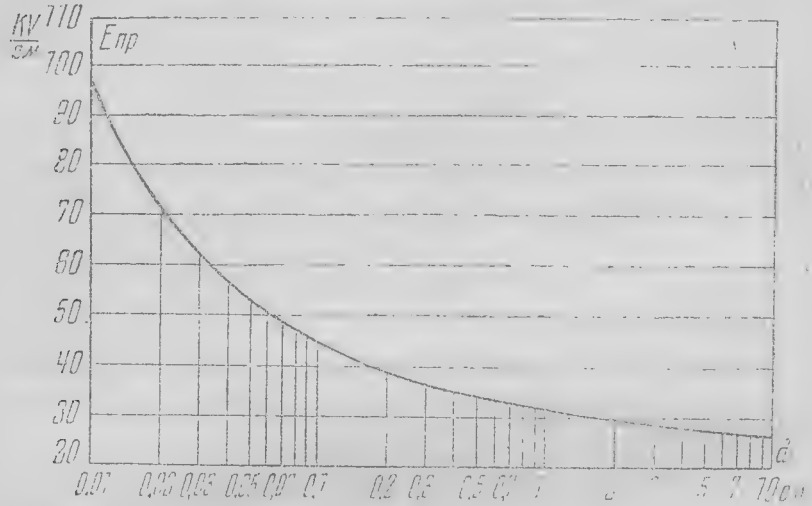


Рис. 51. Зависимость пробивной напряженности от расстояния между электродами для воздуха в случае однородного поля.

Если для твердых диэлектриков пробивная напряженность в однородном поле остается постоянной при изменении толщины диэлектрика, то при пробое воздуха в однородном поле наблюдается упрочнение в тонких слоях, как это видно из рис. 51. Известно также, что при электрическом пробое твердых диэлектриков пробивное напряжение практически не зависит от частоты, между тем исследование электрической прочности воздуха на разных частотах показывает, что при переходе от низких частот к высоким, пробивные напряжения изменяются: сначала падают, а затем на коротких волнах возрастают. На рис. 52 приведены значения пробивных напряжений воздуха в однородном поле при разных частотах по данным Мюллера. На рис. 53 показана зависимость пробивного напряжения воздуха в резко неоднородном поле от расстояния между электродами при разных частотах по данным Люфта. Частотная зависимость пробивного напряжения воздуха объясняется образованием положительного объемного заряда,

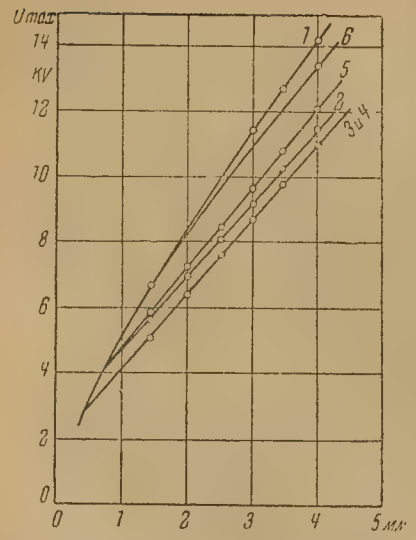


Рис. 52. Зависимость пробивного напряжения воздуха от расстояния между электродами при разных частотах.
Диаметр шаров $d = 10$ *мм*;
1) 50 *гц*; 2) $8{,}8 \cdot 10^5$ *гц*; 3) $2{,}5 \cdot 10^6$ *гц*; 4) $3{,}3 \cdot 10^6$ *гц*; 5) $1{,}2 \cdot 10^7$ *гц*; 6) $2{,}5 \cdot 10^7$ *гц*.

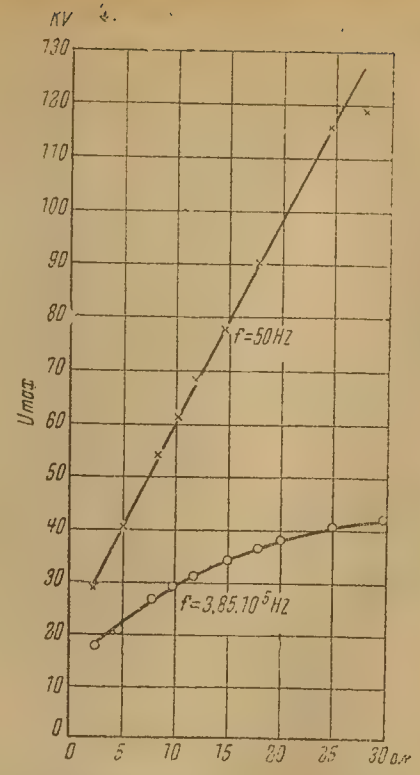


Рис. 53. Зависимость пробивного напряжения воздуха от расстояния между электродами при разных частотах.
Электроды: игла—плоскость.

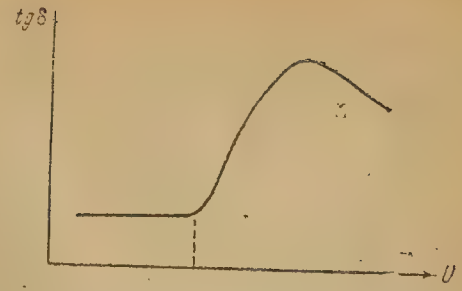


Рис. 54. Изменение tgδ в зависимости от напряжения для изоляции с воздушным включением.

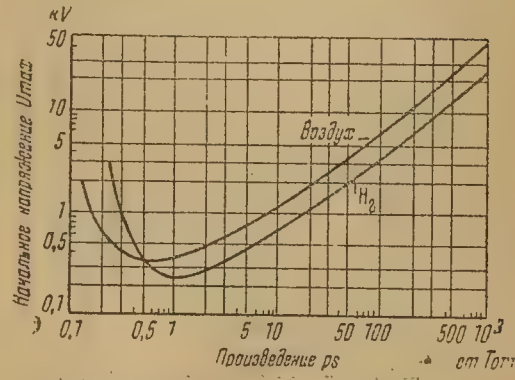


Рис. 55. Зависимость разрядного напряжения от произведения давления P на межэлектродное расстояние S для воздуха и водорода.

вследствие малой подвижности положительных ионов, сравнительно с электронами, что вызывает снижение пробивных напряжений при переходе от низких частот к высоким.

При очень коротких волнах пробивные напряжения воздуха снова возрастают вследствие уменьшения энергии, накапливаемой электронами в течение полупериода.

Напряжения начала короны при высокой частоте до у. к. в. мало отличаются от начальных напряжений при низкой частоте. Как следует из рис. 52, в однородном поле пробивные напряжения в указанном диапазоне частот также мало отличаются. В неоднородном поле пробой воздуха при высоких частотах наступает значительно раньше, чем при низкой частоте. В однородном поле при критическом напряжении газ сразу теряет свойства диэлектрика и пробивается. В практических условиях однородное поле встречается редко, только в специальных устройствах.

При частичном пробое газа потери на ионизацию (корону) возрастают с повышением напряжения и приближенно могут быть вычислены по формуле Пика

$$P_{\text{ион}} = A \cdot f(U - U_0)^2, \qquad (76)$$

где A — постоянный коэфициент,

f — частота,

U — приложенное напряжение,

U_0 — напряжение, соответствующее началу короны.

Выражая потери на ионизацию газа обычной формулой для потерь в конденсаторе $P_{\text{ион}} = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$, легко видеть, что произведение $C \cdot \operatorname{tg}\delta$ при постоянной частоте будет возрастать с напряжением, если формула Пика справедлива. Опыт показывает, что в газовом конденсаторе с неоднородным электрическим полем возрастают с напряжением и $\operatorname{tg}\delta$ и емкость до наступления пробоя.

Если последовательно с газовым промежутком включен твердый диэлектрик с большой электрической прочностью, то при интенсивной ионизации газа $\operatorname{tg}\delta$ с повышением напряжения начинает уменьшаться, так как падение напряжения на газовом слое после полной ионизации остается практически постоянным, что эквивалентно уменьшению сопротивления газового слоя, и, следовательно, уменьшению угла потерь системы. По так называемым кривым ионизации, представляющим зависимость $\operatorname{tg}\delta$ изоляции устройства от напряжения, полученным для высоковольтного кабеля, электрической машины, конденсатора и т. д., судят о наличии в изоляции воздушных включений. На рис. 54 представлена типичная кривая ионизации изоляции, содержащей воздушные включения.

Особенно вредны газовые включения в изоляции высокочастотных устройств, в том числе в конденсаторах; в

этом случае ионизация начинается при сравнительно низких напряжениях и корона интенсивно разрушает твердый диэлектрик, например, слюду. Наличие газовых включений в слюдяных конденсаторах, залитых парафином, ограничивает величину рабочего напряжения на пластину слюды при радиочастотах; это напряжение составляет всего 250—300 вольт на пластину толщиной 50—60μ при 2—2,5-кратном запасе по напряжению короны. Для повышения рабочих напряжений слюдяные конденсаторы заливают органическими составами.

Возникновение ионизации газа в закрытых порах керамических высокочастотных конденсаторов приводит к особому виду пробоя — „ионизационному", при очень незначительных напряжениях высокой частоты.

Образующиеся в результате ионизации воздуха озон и окислы азота вредно действуют на материалы деталей устройства, в особенности на органические. При радиочастотах ионизация газа сопровождается настолько большим выделением тепла, что окружающая изоляция может быть разрушена термическим действием короны. Интенсивность короны возрастает с увеличением частоты и при ультракоротких волнах корона уже не наблюдается, а возникает так называемое факельное истечение; последнее представляет собой вольтову дугу, но не обычную, а исходящую из одного электрода в виде языка пламени факела, и не перекидывающуюся на второй электрод. Образовавшийся факел поддерживается достаточно большим емкостным током.

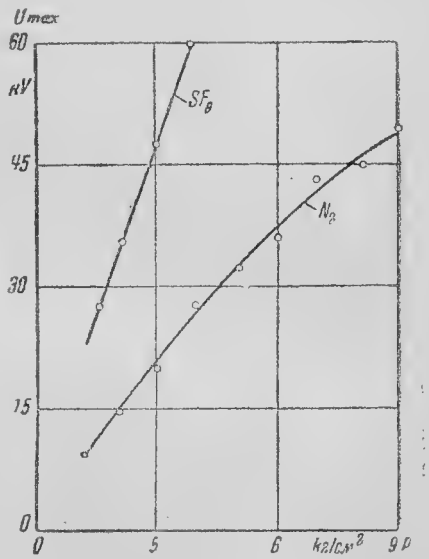


Рис. 56. Зависимость пробивного напряжения элегаза и азота от давления при постоянном напряжении.

Пробивное напряжение воздуха зависит от давления, как это следует из рис. 55. При повышении давления газа коронное и пробивное напряжения в нем возрастают как при низкой, так и при высоких частотах, так как длина свободного пути электрона уменьшается. Минимальные пробивные напряжения при расстоянии между электродами в 1 *см* для различных газов лежат при давлениях от 0,5 до 4 *torr*. Для воздуха минимальное напряжение составляет около 370 вольт.

Сжатый газ обладает высокими пробивными и пробивными напряжениями, не имеет диэлектрических потерь и поэтому с успехом может быть использован как диэлектрик в высоковольтных высокочастотных конденсаторах для колебательных контуров. Особенно благоприятные результаты дает применение в электротехнических устройствах так называемого элегаза (гексафторида серы, сжатого под давлением нескольких атмосфер. На рис. 56 и 57 приведены зависимости пробивного напряжения этого газа сравнительно с воздухом от давления при нормальной и высокой частотах.

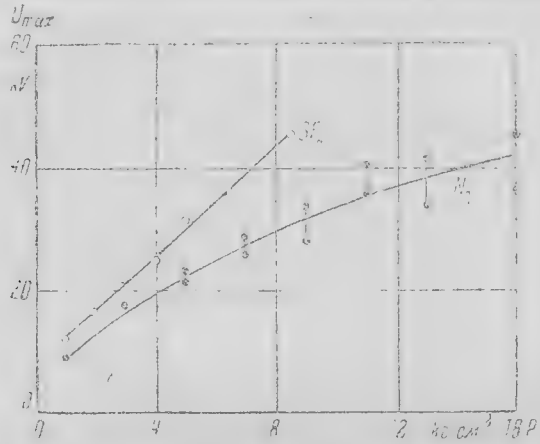


Рис. 57. Зависимость пробивного напряжения элегаза и азота от давления при высокой частоте $f = 4{,}3 \cdot 10^5$ *гц*.

Наоборот, пониженная плотность воздуха, которая практически сказывается или в случае разреженного атмосферного давления (на больших высотах) или при повышенных температурах, ведет к резкому снижению разрядных напряжений. При давлении 100 *мм* ртутного столба разрядные напряжения снижаются в несколько раз по отношению к напряжению при нормальном давлении.

Повышение температуры изолятора с 20 до 70–80° снижает разрядное напряжение при постоянном токе до 35%, в зависимости от конфигурации изолятора.

Пробой высокого вакуума связан с вырыванием электронов из электродов, и наблюдается при очень высоких напряженностях свыше 1000 *кв/см*.

§ 27. Классификация изоляторов в связи с поверхностным перекрытием

Как было указано выше, разряд по поверхности диэлектрика возникает обычно при более низких напряжениях, чем в случае, когда между электродами находится только

воздух. На величину разрядного напряжения оказывают влияние следующие факторы:

1) форма электрического поля, обусловленная конфигурацией электродов и конфигурацией диэлектрика;

2) частота поля;

3) состояние поверхности (загрязненная, увлажненная и др.);

4) емкость, образованная электродами (диэлектрическая проницаемость, толщина материала);

5) плотность воздуха (температура, давление).

Форма электрического поля оказывает основное влияние на величину разрядного напряжения. Частота поля сказывается и проявляется в большей или меньшей

Рис. 58. Типовые изоляторы с различным расположением электродов.

степени, смотря по тому, насколько однородно электрическое поле изолятора.

Технические детали в отношении поверхностного разряда можно свести к следующим четырем простым конфигурациям.

1. Пластина с цилиндрическими электродами, вставленными в нее параллельно друг другу или концентрически (рис. 58, *а* и *а'*).

Таким путем монтируются всевозможные платы, панели, щитки из керамики, микалекса или пластмассы, а также конденсаторы с коаксиальными электродами (согласно рис. 58, *а*), например, серные.

2. Трубка, пластина, с плотно прилегающими к поверхности электродами, как показано на рис. 58 *б* и *б'*.

Такое расположение электродов имеется, например, на цилиндрических вводах или на трубчатых низковольтных конденсаторах, оформляемых путем металлизации их поверхности.

3. Проходной изолятор с центральным стержнем и концентрическим фланцем у основания, например, подвесной, палочный или опорный изолятор (рис. 58, *в* и *в'*).

4. Опорный изолятор или плоский конденсатор (рис. 58, *г*), с плотно прилегающими к поверхности электродами.

Рассмотренные выше технические детали отличаются формой электрического поля, которая, однако, может резко меняться при самых незначительных изменениях конфигурации и расположения электродов.

Для первого типа изделий разрядные напряжения тем больше, чем больше диаметры электродов, т. е., чем однороднее поле.

Приводим данные о разрядных напряжениях при высокой частоте для пластин из микалекса и полистирола.

Разрядное напряжение (в *кв*. при $f=10^6$ *гц*)

Диаметр электродов (болтов)	По микалексу	По полистиролу	Расстояние между электродами в *мм*
3	5	—	35
4	6	—	35
5	7	—	35
5/40	—	12—14	17

Неплотное прилегание электродов к диэлектрику (наличие воздушного зазора) вызывает ионизацию газа, что определяет более раннее перекрытие.

Чем выше диэлектрическая проницаемость материала, тем этот эффект заметнее выражен.

Изделия второго типа характеризуются резко неоднородным электрическим полем и низкими значениями разрядных напряжений. Независимо от материала диэлектрика при острых электродах на поверхности изолятора разрядные напряжения при расстоянии между электродами 20 *мм* составляют 6 — 7 *кв* на радиочастоте и 13 — 15 *кв* при промышленной частоте, и мало меняются с увеличением расстояния при высокой частоте. Как видно из таблицы 7 значение напряжений перекрытия при высокой частоте значительно ниже, чем при технической частоте, что находит свое объяснение в эффекте быстрого прорастания короны при радиочастотах, поддерживаемой емкостным током. Влияние диэлектрической проницаемости материала на разрядные напряжения можно связать с ранним возникновением короны в воздушном промежутке из-за неплотного прилегания электрода у края электродов, благодаря перераспределению напряжений.

Загрязнения, увлажнения поверхности здесь мало сказываются на величине разрядного напряжения.

Чтобы повысить напряжение перекрытия, в этом случае применяются утолщения диэлектрика у краев электродов с полусферическими выемками, как показано на рис. 59.

Проходной изолятор, показанный на рис. 58 *в*[1], отличается малой емкостью между электродами и высокими значениями разрядных напряжений в противоположность цилиндрическому вводу рис. 58, *б*.

Таблица 7

Разрядные напряжения на поверхности разных диэлектриков на стержнях с фольговыми электродами

Название материала	Диэлектрич. проницаем. ε	Расстояние между электродами в мм	Диаметр и форма стержня	Разрядное напряжение в kV	
				$f=1{,}5\cdot10^6$ гц	$f=50$ гц
Тиканд	60	20	◎ $\phi=\frac{28}{20}$	5-6	15-17
Алюминасил	10	20	◎ $\phi=\frac{33}{23}$	6-7	16-18
Миколекс	7	20	⬡ $\phi=25$	8-9	16-18
Фарфор	6	15	◎ $\phi=\frac{25}{13}$	7,5-8,5	12-13
Стекло	6,5	15	◎ $\phi=\frac{30}{26}$	8-9	12-13
Полистирол	2,7	15	□ 10×10	7,5-8,5	10-11

Четвертый случай (рис. 58, *г*) представляет большой технический интерес, так как дает возможность при малых расстояниях получать очень большие разрядные напряжения.

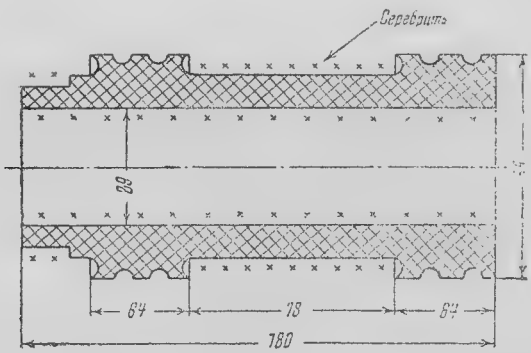


Рис. 59. Трубчатый керамический высоковольтный конденсатор со сферическими выточками на краях.

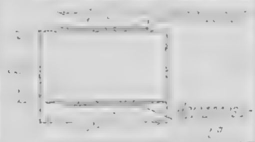
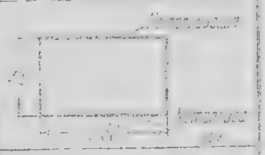
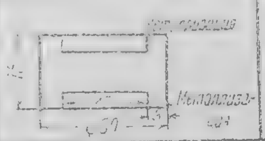
Расположение электродов здесь может быть осуществлено тремя способами. В таблице 8 приведены чертежи керамических цилиндров, с нанесенными на торцах электродами.

Из таблицы 8 следует, что в резко неоднородном поле разряд при радиочастотах наступает очень рано, сразу вслед

и короной. При переходе к более однородным полям, когда электроды полностью покрывают торцы цилиндра (2), коронные напряжения на низкой частоте повышаются, а разрядные уменьшаются в связи с уменьшением расстояния. Разрядные напряжения при высокой частоте в этом случае, наоборот, значительно повышаются.

Таблица 8

Напряжение поверхностного разряда при технической и высокой частотах при различных конфигурациях поля (в кв)

№	Конфигурация поля	[illegible]		f [illegible]	
		[illegible]	Мокрый изолятор	[illegible]	[illegible]
1		[illegible]	10	[illegible]	[illegible]
2		5- [illegible]	8-9	–	[illegible]
3		–	20-25	–	15-20

Исключительно благоприятные результаты по разрядным напряжениям получаются при конфигурации изолятора согласно (3) в виде „боченка". Здесь величины разрядных напряжений очень близки к значению пробивной напряженности воздуха в однородном поле (22 *кв/см.*), причем напряжения перекрытия при высокой и низкой частотах мало отличаются. Однородное поле, получаемое при такой конфигурации изолятора, легко искажается при загрязнении поверхности проводящими включениями; поэтому изоляторы с однородным электрическим полем должны иметь чистую поверхность.

Атмосферная влажность чрезвычайно сильно влияет на величины разрядных напряжений изоляторов с однородным полем при технической частоте и мало сказывается при высоких частотах.

При технической частоте повышение относительной влажности воздуха с 60% до 80—90% снижает разрядные напряжения на боченочных изоляторах (или конденсаторах) на 40—50%.

Глава VII

ОБЪЕМНАЯ ГИГРОСКОПИЧНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ

§ 29. О природе объемной гигроскопичности

Электрические свойства и область применения электроизолирующих материалов находятся в тесной зависимости от их гигроскопичности. Диэлектрик с хорошими электрическими характеристиками, но поглощающий влагу или растворимый в воде, технически уже не может быть признан высококачественным. Условие отсутствия гигроскопичности является одним из наиболее жестких требований, предъявляемых к изоляторам. Большинство материалов, применяемых в электротехнике, с этой точки зрения, вообще не может быть использовано для целей электроизоляции. Те диэлектрики, которые имеют применение в электротехнике, обычно в той или иной степени поглощают влагу или являются растворимыми, и лишь сравнительно небольшое количество материалов действительно негигроскопично. Известно, например, что волокнистые материалы на основе целлюлозы (дерево, бумага, прессшпан) имеют в сухом состоянии вполне удовлетворительные электроизолирующие свойства; однако, в результате заметного поглощения влаги эти свойства настолько ухудшаются, что применение таких материалов становится очень ограниченным. Многие горные породы и минералы, имеющие в выкушенном состоянии прекрасные электрические характеристики (мрамор, гипс, сильвин, каменная соль и др.), при повышенной влажности воздуха обладают большой объемной или поверхностной проводимостью. Большинство пластических масс (на основе фенол-альдегидных конденсатов, карбамидных смол, эфиров целлюлозы) отличаются гигроскопичностью, и применение их в электротехнике вследствие этого также ограничено. Наконец, отметим, что одним из основных недостатков стекол следует признать гидрофильность их поверхности, вызывающую при высокой влажности окружающей среды значительное возрастание поверхностной проводимости.

Попытаемся выяснить общие законы гигроскопичности твердых диэлектриков как одного из основных факторов, определяющих электрические свойства изолирующих материалов. При анализе механизма гигроскопичности мы остановимся на двух видах — объемной, характерной для пористых материалов, и поверхностной, когда влага не проникает внутрь образца. Общепринятая точка зрения, что при воздействии на диэлектрик влаги электрические свойства определяются полярностью вещества, оказалось, требует уточнения; руководствуясь только соображениями о полярности диэлектрика, нельзя предопределить электри-

ческие свойства образца ни в случае объемной, ни в случае поверхностной гигроскопичности.

Экспериментальные данные показывают, что диэлектрики с очень слабо выраженной полярностью иногда обладают гигроскопичностью, устранение которой невозможно никакими пропитывающими составами (например, пленки из полистирола, некоторые пластические массы и т. д.). Поликристаллические тела могут иметь устранимую и неустранимую пористость даже в пределах одной какой-либо их разновидности (например, различные сорта мраморов). Что касается недообожженных керамических материалов, то они, как правило, имеют неустранимую гигроскопичность. Пропитывание пористой керамики предохраняет материал от действия влажности только до некоторой степени. Анализируя экспериментальный материал, мы убеждаемся, что гигроскопичность продуктов целлюлозы, горных пород, некоторых слабополярных диэлектриков, а также других твердых тел, имеет повсюду одинаковую природу, мало зависящую от материала диэлектрика, и определяющуюся в основном размерами капилляров. Первый закон Лапласа для расчета капиллярных сил в узких сосудах рассматривает смачиваемость как макроскопическую константу, характеризующую взаимодействие разнородных веществ; между тем, когда радиус капилляра становится очень малым (это имеет место для волокон целлюлозы, ряда искусственных смол и т. п.), движение жидкости обусловливается не смачиванием в обычном значении этого слова, а силами непосредственного взаимодействия между отдельными молекулами вещества капилляров и молекулами жидкой фазы. Эти силы имеют место и в том случае, когда пористое тело не смачивается жидкостью. Поэтому объемную гидрофильность приходится изучать на основании данных о размерах капилляров, свойственных диэлектрику, т. е. на основании его структуры. Силы сродства могут ускорять или замедлять процесс поглощения влаги, но существенных изменений они внести не в состоянии.

В зависимости от размеров пор все твердые диэлектрики могут быть разделены на три группы:

I. Материалы с субмикроскопическими порами. Диаметр капилляров этих тел значительно меньше размеров комплекса молекул нейтрального или слабополярного пропитывающего вещества и составляет 5÷30Å. В этом случае вода легко проникает в глубь капилляров диэлектриков; между тем подвижная фаза, состоящая из крупных молекул, не может быть втянута в узкие капилляры. Такая пористость свойственна большинству электроизолирующих материалов. Сюда относятся сами волокна, входящие в состав таких диэлектриков как бумага, дерево,

фибра, гетинакс, шелк, асбест, все пластические массы на основе органического связующего, горные породы (шифер, тальковый сланец), некоторые сорта мрамора (например, серый дымчатый).

Диэлектрики с эластичными свойствами (шелк, бумага и др.) при поглощении влаги набухают, и процесс увлажнения происходит чрезвычайно длительно в противоположность пористым диэлектрикам с жесткой решеткой (горные породы, пористая керамика).

Материалы первой группы поглощают влагу при насыщении в количестве нескольких процентов. Ненабухающие материалы обычно имеют гигроскопичность порядка долей процента.

II. Материалы с микроскопическими порами. Диаметр капилляров этих тел значительно превосходит размер молекул воды и является соизмеримым с размерами комплекса молекул нейтрального или слабополярного пропитывающего вещества. К этим материалам относятся некоторые сорта мрамора (например, прохоро-баландинский). Микроаналитическое исследование величины пор мрамора показывает, что вплоть до 800-кратного увеличения на шлифе нельзя обнаружить пористости. Это обстоятельство позволяет предполагать весьма небольшой по абсолютному значению размер капилляров, возможно, не превышающий 100 А.

III. Материалы с макроскопическими порами. Диаметр капилляров этих тел значительно больше размера комплексов молекул пропитывающего жидкого диэлектрика. Сюда относятся некоторые виды пористой керамики (шамот, кирпич) и диэлектрики, имеющие видимые трещины.

Приведенная выше классификация дает возможность установить характер действия влаги на материал, т. е. природу его гигроскопичности. Материалы первой группы отличаются неустранимой гигроскопичностью. Характерным здесь является чрезвычайно прочное закрепление влаги в капилляре; для того, чтобы удалить ее, требуется значительное повышение температуры или сушка при хорошем вакууме. Наоборот, в случае микрокапилляров, характерных для второй группы, молекулярных усилий, способных удержать влагу, не возникает, и она легко испаряется уже при нормальных условиях. Такие материалы, как мрамор (белый, прохоро-баландинский), при нормальной относительной влажности воздуха обладают достаточно удовлетворительными электрическими свойствами. С другой стороны, при пропитывании мрамора изолирующими составами с крупными комплексами молекул, последние прочно удерживаются в его порах, повидимому, теми же силами, какими

вода удерживается в порах материалов первой группы. В результате гигроскопичность диэлектриков с микроскопической пористостью после пропитки оказывается полностью устраненной. Однако получить естественный или искусственный материал с заданной пористостью трудно.

К третьей группе гигроскопичных диэлектриков относятся материалы с явно выраженной пористостью. Вода сравнительно легко испаряется из таких капилляров, а пропитывающие диэлектрики, хотя и заполняют поры, но плотное прилегание их к стенкам капилляров не обеспечивается. Усадка пропитывающего состава при переходе его из жидкого в твердое состояние является в этом случае неизбежной, и в зазоры между стенками капилляров и пропитывающим составом проникает влага. Одним из практических случаев такой пористости являются капилляры, образующиеся при заливке органическими составами электрических деталей, например, конденсаторов, между стенками кожуха и выводами, с одной стороны, и заливочным составом—с другой. При длительном нахождении таких деталей в атмосфере повышенной влажности наблюдается ухудшение их электроизолирующих свойств. Устранить гигроскопичность диэлектриков с макроскопической пористостью можно только путем пропитки их незатвердевающими вязкими составами. Таким образом, материалы этой группы так же, как и материалы первой группы, обладают неустранимой гигроскопичностью при пропитке их твердыми диэлектриками.

Эти положения хорошо подтверждаются данными о гигроскопичности пластических масс. В этом случае широко варьируются как компоненты, так и структура вещества, благодаря чему можно установить влияние полярности и величины пор. Ниже приводятся результаты исследования гигроскопичности пластических масс, нейтральных и слабополярных гомогенных систем, а также некоторых неорганических диэлектриков.

§ 29. Методика определения гигроскопичности

О гигроскопичности диэлектриков правильнее и проще всего судить по изменению электрических свойств, в частности, по возрастанию величины угла потерь после выдержки образца в роде или в атмосфере 100% относительной влажности. Метод взвешивания, которым определяется количество поглощенной влаги не может служить критерием изменения электрических свойств. Известно, что одно и то же количество поглощенной воды совершенно по разному влияет на электрические свойства различных диэлектриков. Так например, при поглощении влаги мрамором в количестве около 0,1% электри-

ческие свойства его катастрофически падают, между тем довольно значительное поглощение влаги бумагой или шелком, до 5—6%, сравнительно мало сказывается на величине угла потерь при высокой частоте. Кроме того в ряде случаев метод взвешивания может ввести в заблуждение о степени гигроскопичности материала, например, при летучести или растворимости его, в то время, как снижение электрических свойств диэлектрика после выдержки в воде всегда связано с поглощением влаги материалом.

Оценка материалов для высокочастотных устройств с точки зрения их влагостойкости должна производиться по изменению угла диэлектрических потерь после пребывания образца во влажной атмосфере или непосредственно в воде. Определение других электрических характеристик увлажненных образцов, удельного объемного сопротивления, электрической прочности, диэлектрической проницаемости, требует более сложной методики и не всегда дает правильное указание о наличии объемной пористости, в особенности, если она мала.

Приводимые ниже результаты по изменению $tg\delta$ увлажненных диэлектриков получены при частоте $f = 10^6$ *гц*.

§ 30. Гигроскопичность неоднородных диэлектриков

Неоднородные диэлектрики характеризуются наличием в своем составе двух или более компонент, являющихся индивидуальными веществами.

Неоднородные диэлектрики представляют собой либо системы, состоящие из связующего вещества как основной фазы и диспергированного в ней наполнителя, механически связанных друг с другом, либо системы, компоненты которых растворяются в поверхностных слоях. К первым материалам относятся прежде всего пластические массы с наполнителем. Вторую группу составляют неорганические неоднородные материалы: микалекс, керамика и др.

Материалы первой группы (пластмассы) могут быть негигроскопичными только в том случае, когда каждая частица наполнителя со всех сторон заключена в оболочку непроницаемого для воды связующего. Применение горячего прессования пластических масс позволяет до некоторой степени осуществить это условие. Однако специфические особенности этого метода также влекут за собой гигроскопичность материала. Основным фактором, определяющим степень поглощения влаги пластмассой с органическим связующим, полученной горячим прессованием, является разница в коэфициентах термического расширения компонент материала. Во всех практических случаях эти коэфициенты различны. Поэтому по охлаждении материала в

пластмассе образуются трещинки капилляра между частицами связующего и наполнителя.

На рис. 60 показано влияние действия влаги на угол потерь пластмасс на основе слабополярных и неполярных диэлектриков—стирола, парафина и канифоли. Большинство этих пластмасс не имеет технического значения и представляет интерес лишь для исследования. Как видно, все обследованные материалы интенсивно поглощают влагу; гигроскопичными оказываются даже такие системы, как

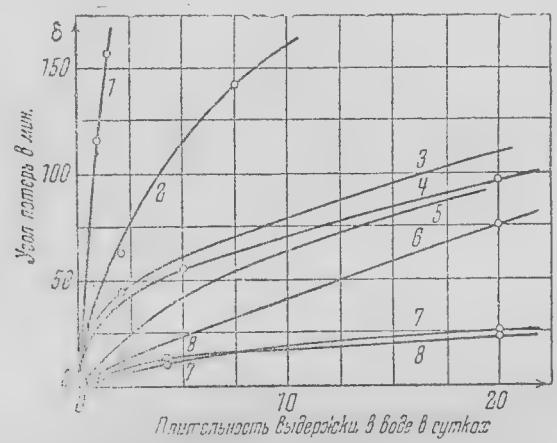


Рис. 60. Зависимость угла диэлектрических потерь от длительности выдержки образца в воде: 1—стирол-мрамор (прессовка при t=120°С); 2—стирол-мрамор (прессовка при t=190°С); 3—стирол парафин; 4—парафин-битум; 5 стирол-сера; 6—парафин-сера; 7—парафин-канифоль *K*; 8—парафин-канифоль *W*.

стирол-парафин, стирол-сера и стирол-битум. Пластмассы, содержащие нафталин, также гигроскопичны. Опыт показывает, что гигроскопичность прессованных материалов с органическим связующим неустранима. Пропитывание парафином пластмассы стирол-мрамор, с содержанием компонент 50/50% не дает положительных результатов. Так, если в воздушно-сухом состоянии угол потерь этой пластмассы равен 3′, то после выдержки в воде в течение 48 часов был получен угол потерь для непропитанной пластмассы стирол-мрамор 190′ и для пропитанной парафином 170′.

Представляют интерес кривые обсыхания пластмассы стирол-мрамор. Образцы этого материала были подвергнуты 48-часовому воздействию воды. После этого периодически измерялся угол потерь в функции времени обсыхания. Об-

разцы с крупными порами (прессовка из крупнодисперсного порошка) поглощают большое количество влаги, но относительно быстро отдают ее. Образцы с мелкими узкими капиллярами (прессовка из тонкодисперсного порошка) поглощают меньшее количество влаги, однако, обсыхание такого материала чрезвычайно затруднено. Угол потерь материала медленно приближается к своему начальному значению и даже после выдержки образца в течение нескольких суток в атмосфере нормальной влажности воздуха не достигает этого значения. Капилляры, образующиеся в пластмассах, имеющих техническое значение, по размерам относятся к субмикроскопическим и микроскопическим

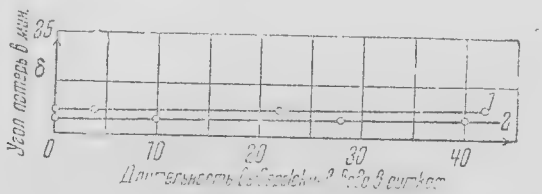


Рис. 61. Метод предварительной проварки перед прессовкой.
1—парафин-битум; 2—парафин-канифоль.

Уменьшить пористость пластических масс можно: а) путем подбора наполнителя и связующего таким образом, чтобы их коэфициенты термического расширения совпадали или были возможно ближе по своему значению;

б) путем применения интенсивной термической обработки, в результате которой происходило бы химическое взаимодействие между связующим и наполнителем или образовался их раствор. Пониженная гигроскопичность системы парафин-канифоль (рис. 60) объясняется, очевидно, образованием частичного раствора между этими компонентами.

Как видно из рис. 61, растворы парафин-канифоль и парафин-битум негигроскопичны. В этом случае мы имеем, однако, уже однофазную систему. Среди технических диэлектриков применение интенсивной термической обработки имеет место в технологии керамики и микалекса. Отсутствие влагопоглощения микалекса объясняется поверхностным взаимодействием слюды и стекла и образованием, в известной степени, новой однородной системы. Эбонит первого сорта также может быть отнесен к химически прореагировавшим материалам, так как в процессе вулканизации сера и каучук взаимодействуют друг с другом. Наоборот, эбонит второго сорта, содержащий наполнители, неспособные реагировать с каучуком (например, тальковый

муку, каолин), оказывается гигроскопичным. Применение вальцовки в технологическом процессе изготовления пластических масс позволяет провести более интенсивное взаимодействие между связующим и наполнителем. Водопоглощение вальцованной пластмассы стирол-битум значительно меньше, чем у того же материала, изготовленного методом смешения порошков. Сложные материалы, компоненты которых не могут прореагировать надлежащим образом друг с другом (часто в случае органического связующего и неорганического наполнителя), являются всегда гигроскопичными.

§ 31. Гигроскопичность однородных диэлектриков

Рассмотрим природу гигроскопичности аморфных и мелкокристаллических тел. Аморфные неколлоидальные тела не обладают пористостью и не гигроскопичны. Сюда относятся неорганические стекла, полистирол, канифоль, чистый бакелит и некоторые другие органические смолы. Мелкокристаллические материалы могут быть гигроскопичны и негигроскопичны, в зависимости от плотности их структуры. К таким телам относятся горные породы—мрамор, шифер, тальк, органические вещества—парафин, галовакс.

Детальное обследование аморфных и мелкокристаллических тел с плотной структурой типа парафина показывает, что в некоторых случаях и эти материалы оказываются гигроскопичными. Возникновение пор вызывается иногда термическими процессами, а иногда перерождением диэлектрика. Так, например, поглощение влаги органическими смолами с нейтральной или слабополярной молекулой может возникнуть вследствие растрескивания при охлаждении из расплава (недостаточный отжиг материала). В систему трещинок и каналов, пронизывающих образец, проникает влага и ухудшает электрические характеристики диэлектрика. Такого рода пористость возникает при определенных условиях в канифоли и высоко-плавких битумах (рис. 62). Соблюдение необходимых предосторожностей при изготовлении изделий из этих материалов (тщательный отжиг) устраняет их гигроскопичность. Поглощение влаги мелкокристаллическими телами с плотной структурой также в ряде случаев находит себе объяснение в явлениях растрескивания при изготовлении. Из органических диэлектриков такая пористость свойственна, например, нафталину (рис. 62). Возникновение гигроскопичности возможно и в результате химических реакций в материале. Изменение структуры и образование пористости здесь связаны обычно с окислением или деполимеризацией нейтрального

или слабополярного диэлектрика. В качестве примеров могут служить полистирол и парафин. Кривая угла потерь нор-

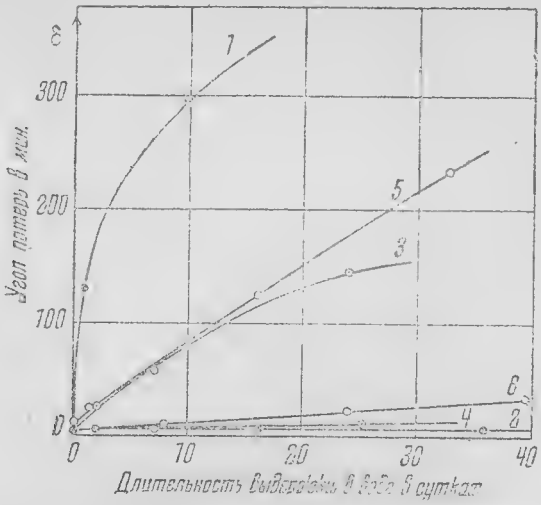


Рис. 62—1 канифоль растрескавшаяся; 2—канифоль прогретая; 3—битум растрескавшийся (высокоплавкий); 4—битум близ *Tg* (низкоплавкий, 5—нафталин растрескавшийся; 6—нафталин пластифицированный (прибавка канифоли).

мального полистирола, в зависимости от длительности выдержки материала в воде, идет совершенно горизонтально.

Рис. 63. Влияние размера пор на характер обсыхания: 1—окисливший парафин; 2—деполимеризованный стирол; 3—мрамор непропитанный.

Структура такого полистирола непроницаема для воды. Сильная деполимеризация приводит к возникновению мелких капилляров, поглощающих влагу.

В заключение остановимся на вопросе отдачи (ресорбции) поглощенной влаги аморфными и мелкокристаллическими диэлектриками, т. е. на явлении их естественного обсыхания. Скорость обсыхания зависит от размеров тех трещинок и капилляров, которые имеются в образце материала. Независимо от полярности диэлектрика в случае субмикроскопических капилляров влага прочно закреплена в порах и нормальной просушкой ее трудно удалить из диэлектрика. В случае крупных капилляров влага поглощается в большом количестве, однако, при естественном обсыхании образца легко испаряется из его капилляров. На рис. 63 приведена зависимость угла потерь от времени обсыхания для некоторых пористых диэлектриков.

Глава VIII

ПОВЕРХНОСТНАЯ ГИГРОСКОПИЧНОСТЬ И ПОВЕРХНОСТНАЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

§ 32. Общие замечания

Поверхностная электропроводность обусловлена присутствием влаги на поверхности диэлектрика. Вода отличается электропроводностью, много большей, чем у всех технических диэлектриков и достаточно ничтожно тонкого ее слоя, чтобы была обнаружена заметная проводимость. Влага попадает на поверхность диэлектрика из окружающего воздуха, в котором обычно содержится большое количество водяного пара, благодаря адсорбирующей способности поверхности, а также вследствие явления капиллярной конденсации.

Поверхностная проводимость диэлектрика зависит, таким образом, от толщины слоя и свойств адсорбированной влаги, а не является свойством самого диэлектрика. Однако, поскольку толщина адсорбированной пленки определяется материалом, с поверхностью которого она связана, и объемное сопротивление ее зависит от особенностей этого материала, поверхностную проводимость часто рассматривают как свойство самого диэлектрика.

Явление поверхностной проводимости твердых диэлектриков подвергалось изучению как с точки зрения физических процессов, происходящих при соприкосновении парообразной влаги с твердым телом, так и в направлении обследования свойств существующих технических изолирующих материалов. Практически принято считать, что поверхностная электропроводность тем меньше, чем меньше полярность вещества, чем чище поверхность диэлектрика и чем она лучше полирована. Загрязненность поверхности и наличие капилляров мало сказываются на поверхностной

электропроводности гидрофобных диэлектриков. В общем случае, однако, разделение диэлектриков на полярные и неполярные, с точки зрения поверхностной электропроводности, не подтверждается. Поверхностное сопротивление твердых недиссоциирующих в воде полярных диэлектриков, как показывают последние исследования, не зависит, или очень слабо зависит от влажности воздуха, также, как и у неполярных материалов. Наблюдавшаяся у таких тел сильная зависимость ρ_s от относительной влажности с двумя характерными точками перегиба, — является результатом неправильной методики и обусловлена, главным образом, присутствием на поверхности диэлектрика слабосвязанных посторонних веществ.

§ 33. Классификация диэлектриков с точки зрения их поверхностной электропроводности

Существующие инструкции, предназначаемые для руководства к измерениям электропроводности диэлектриков, делят изолирующие материалы на три класса по отношению к взаимодействию их с влагой.

I класс. Материалы, поверхность которых не смачивается водой. Конденсирующаяся на таких материалах влага не распространяется по всей поверхности, т. е. не образует непрерывного слоя.

II класс. Материалы, поверхность которых смачивается водой, но которые не поглощают объемом воду. Осаждающаяся на таких материалах влага распространяется по всей поверхности и образует сплошной поверхностный слой. Примером могут служить стекло, кварц, керамика.

III класс. Материалы, поглощающие воду всем объемом.

Ниже дана другая классификация, в основу которой положен приведенный в последующих параграфах экспериментальный материал.

I.—Нерастворимые в воде диэлектрики:

а) нейтральные и слабополярные (несмачивающиеся водой) и б) полярные (смачивающиеся водой).

К первой подгруппе относятся парафин, сера, полистирол, эбонит. Ко второй подгруппе относятся некоторые виды керамики, качественный микалекс.

Все материалы этой группы характеризуются высоким поверхностным сопротивлением, мало зависящим от влажности окружающей среды. Однако высокое поверхностное сопротивление во влажной среде полярных диэлектриков

обеспечивается лишь при полном отсутствии загрязнения их поверхности.

II.—Частично растворимые в воде материалы. К этой группе относятся щелочные и боратные стекла.

Таким материалам свойственно более низкое поверхностное сопротивление, довольно сильно зависящее от влажности.

III.—Диэлектрики с пористой структурой. Сюда следует отнести целлюлозные волокнистые электроизолирующие материалы, асбест, мрамор, тальк, а также большинство пластических масс. После пребывания во влаге они обнаруживают большую электропроводность.

§ 34. О методике измерения поверхностной электропроводности

Правильный выбор методики, как известно, предопределяет экспериментальные данные, а, следовательно, и построение той или иной теории, объясняющей результаты опыта. Поверхностное сопротивление диэлектриков является характеристикой, чувствительной по отношению к ряду факторов. Такими факторами могут быть вещества, случайно нанесенные на поверхность (жиры, различные соли, масла), пористая структура материала, его растворимость в воде. Действующие в настоящее время инструкции по измерению поверхностной электропроводности не затрагивают эти вопросы. В них нет обычно указаний о методике очистки образцов от загрязнения, т. е. не предусмотрены те превходящие факторы, которые оказывают решительное влияние на характер проводимости. Этим может быть объясняется обилие противоречивых данных, получаемых различными исследователями и приводимых в технической литературе о поверхностной электропроводности диэлектриков.

Большое внимание необходимо уделять выбору электродов, их формы. Наиболее удобными электродами являются фольговые. В качестве клеющего вещества следует использовать парафин, материал совершенно не растворяющийся в воде. Хорошо притертая фольга обеспечивает вполне удовлетворительный контакт. Электроды должны иметь форму концентрических окружностей. Положительный потенциал подается на внутренний электрод, а внешнее кольцо заземляется. Только такое устройство электродов совершенно исключает утечку тока по торцам образца, по обратной стороне его, а также по изолирующей подставке. Так как обычно образцы берут руками за торцы, то проводимость этих участков очень большая. Неконцентрические электроды сильно искажают результат.

Приводим некоторые данные, полученные из этих опытов:

Удельное поверхностное сопротивление (в *омах*)

Название диэлектрика	Форма электродов		Относит. влажность в %
	Полоски	Концентрическая	
Плавленный кварц	$3 \cdot 10^{10}$	10^{13}	80
Радиофарфор	$7 \cdot 10^{11}$	10^{13}	„
Алюминоксид	$7 \cdot 10^{10}$	10^{13}	„
Ультрафарфор	$6 \cdot 10^{10}$	10^{13}	„

Если образец имеет большую площадь и электроды можно расположить на значительном расстоянии от краев, столь резкой разницы вследствие различия формы электродов не будет наблюдаться. Ртутные электроды для измерения поверхностного сопротивления неудобны. Кольцо смещается с первоначального положения, при этом нарушается концентричность окружности, а иногда происходит замыкание колец. Восстановить первоначальное положение уже нельзя, так как испытуемая поверхность сильно загрязняется от ртути и приготовленный к испытанию образец становится негодным. Значительное изменение поверхностного сопротивления образца, выдерживаемого во влажности, происходит в течение первого часа. Дальше оно выражено менее резко. Двух-трехчасовой выдержки образца в эксикаторе оказывается достаточным.

Образцы, поверхность которых совершенно не очищена, имеют, как правило, поверхностное сопротивление ниже в десятки, сотни и тысячи раз. В качестве примера приведем данные, которые показывают насколько ρ_s неочищенных образцов ниже, чем очищенных:

Поверхностное сопротивление образцов при 70 % относительной влажности (в *омах*)

Название диэлектрика	ρ_s при неочищенной поверхности	ρ_s после очистки
Оконное стекло	$2 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^{11}$
Плавленный кварц	$2 \cdot 10^8$	$1 \quad 10^{13}$
Бессвинцовый микалекс . . .	$1 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{13}$

Очистку поверхности диэлектрика производят различными способами. Загрязнения с поверхности удаляют путем применения растворителей, а иногда прокаливанием до температуры 600—700° С.

Наиболее распространенные в технике растворители—винный спирт, толуол, ксилол, водопроводная вода, дистиллированная вода. Сама очистка осуществляется следующими способами:

1) образцы перед измерением много раз протирают ватой, смоченной в спирте, ксилоле или толуоле;

2) образцы промывают мыльной водой, тщательно прополаскивают чистой водой, а затем кипятят несколько раз в свежих порциях дистиллированной воды;

3) образец протирается несколько раз ватками, смоченными в растворителе, а затем выдерживается в муфеле около двух часов при температуре 500—700° С.

Приведем сравнительные данные удельного поверхностного сопротивления для материалов, поверхность которых очищена указанными способами: (при 70 % относительной влажности).

Влияние способа очистки на удельное поверхностное сопротивление диэлектриков (ρ_s в *омах*)

Способ очистки	ρ_s силикатного стекла	ρ_s кварцевого стекла	ρ_s бессвинцового микалекса
1-й способ	$3 \cdot 10^9$	$7 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^9$
2-й способ	$3 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{13}$	10^{13}
3-й способ	$2 \cdot 10^{11}$	10^{13}	—

В случае очистки образца ватой или тканью, смоченной растворителем, удельное поверхностное сопротивление значительно ниже, чем при двух других способах.

Иллюстрацией результатов применения различных растворителей служит удельное поверхностное сопротивление стекла и плавленного кварца, очищенных толуолом, ксилолом и винным спиртом, при 70 % относительной влажности, причем образцы после очистки прогревались около 1 часа.

Удельное поверхностное сопротивление диэлектриков при очистке растворителями (в *омах*)

Растворители	ρ_s силикатного стекла	ρ_s плавленного кварца
Эфир	$6 \cdot 10^9$	—
Толуол	$1 \cdot 10^9$	—
Ксилол	$3 \cdot 10^9$	$8 \cdot 10^{10}$
Винный спирт	$3 \cdot 10^9$	$7 \cdot 10^{10}$
Ксилол и винный спирт	—	$8 \cdot 10^{10}$

Возможно, что после очистки растворителем, загрязнения не полностью удаляются с поверхности. Кроме того, на шероховатой поверхности остаются ворсинки, которые мо-

гут образовать проводящие мостики. Хорошие результаты получаются лишь если поверхность диэлектрика очищена по 2-му или 3-му способу.

Керамические материалы и плавленный кварц можно испытывать с серебряными электродами, нанесенными вжиганием. Слюда и стекло после кипячения в мыльной и в дистиллированной воде выдерживаются около двух часов при температуре 500°С

Применение указанной методики дает вполне удовлетворительную воспроизводимость результатов; наибольшее отношение величин поверхностной электропроводности не превышает двух-трех для разных образцов.

§ 35. Экспериментальные данные по поверхностной электропроводности

Приведем данные по поверхностной электропроводности материалов различных классов—неполярных и полярных, в разной степени растворимых в воде. На рис. 64 приведе-

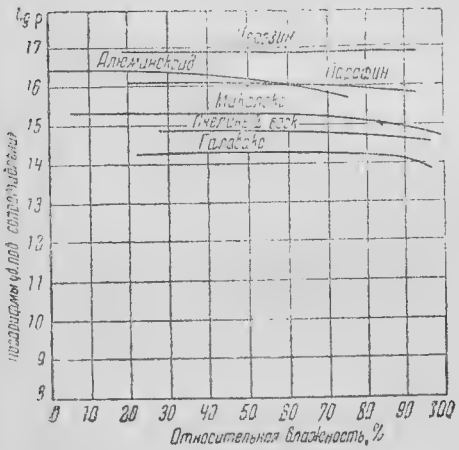


Рис. 64. Диэлектрики 1-й группы (нейтральные и полярные нерастворимые в воде).

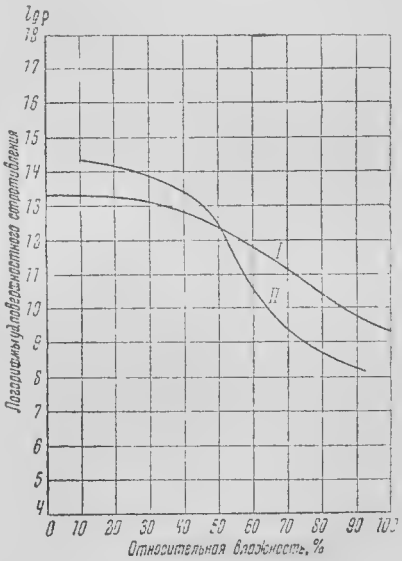


Рис. 65. Диэлектрики 2-й группы (частично растворимые в воде). I—щелочное стекло, II—обратное стекло.

ны кривые зависимости поверхностного сопротивления от влажности для 1-й группы материалов, нейтральных и полярных, но нерастворимых в воде.

Чистый алюминоксид, обладающий диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 10$, имеет поверхностное сопротивление

более высокое, чем у парафина с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 1{,}8 - 2$. При очень малой относительной влажности удельное поверхностное сопротивление равно приблизительно 2.10^{16} *ом*; с увеличением влажности ρ_s чистого алюминоксида слегка снижается, достигая при 90% относительной влажности 10^{14} *ом*. Полярные ультрафарфор и радиофарфор также обнаруживают больше значения удельного поверхностного сопротивления, мало зависящие от влажности.

На рис. 65 приведены зависимости для 2-й группы диэлектриков, частично растворяющихся во влажной атмосфере. Повышенную электропроводность воды на поверхности стекла можно объяснить растворением некоторых составных частей стекла в воде, например, ионов, натрия и калия, о чем упоминалось ранее. Имеются данные, что толщина слоя воды на поверхности чистого плавленного кварца при 90% относительной влажности 30—60 Å, а на кварце с загрязненной поверхностью 140—620 Å при этой же влажности.

Основываясь на этих данных и предположив, что влага равномерно распределена по всей поверхности плавленного кварца, Кертис определил, что проводимость пленки воды на очищенном кварце равна 2.10^{-6} *ом*$^{-1}$/*см*. Проводимость же пленки влаги на кварце с загрязненной поверхностью при 90% относительной влажности много больше и равна 2.10^{-3} *ом*$^{-1}$/*см*.

На рис. 66 приводятся характеристики III группы изоляторов, обладающих пористой структурой. Все они обладают очень низким значением ρ_s, резко снижающимся при высоких влажностях.

Рисунки 67, 68, 69 дают зависимость поверхностного сопротивления от влажности для ряда диэлектриков технического значения. Тиконд с большой диэлектрической проницаемостью (ε=50—80) имеет очень высокое электрическое сопротивление. Поверхностное сопротивление неочищенного алюминоксида значительно ниже, чем у очищенного, при всех влажностях. Представляет интерес, что характер, а также абсолютные значения удельного поверхностного сопротивления для неочищенного тиконда и алюминоксида примерно совпадают, но, конечно, не являются достаточно определенными характеристиками.

Для слюды (рис. 67) характер зависимости ρ_s от влажности тот же, что для неочищенных керамических образцов. Можно думать, что на сопротивление слюды сказывается влияние объемной проводимости (вдоль внутренних слоев). Толщина слоя влаги между пластинками слюды больше, чем на внешней поверхности ее, благодаря явлению капиллярной конденсации; так как внешний слой слюды всегда имеет

трещины, царапины и т. п. дефекты, то возможно соединение проводящих слоев в электрическую цепь, параллельно внешней поверхности.

Поверхностная электропроводность микалекса (рис. 68) определяется поверхностной электропроводностью входящего в его состав стекла, несмотря на то, что количество

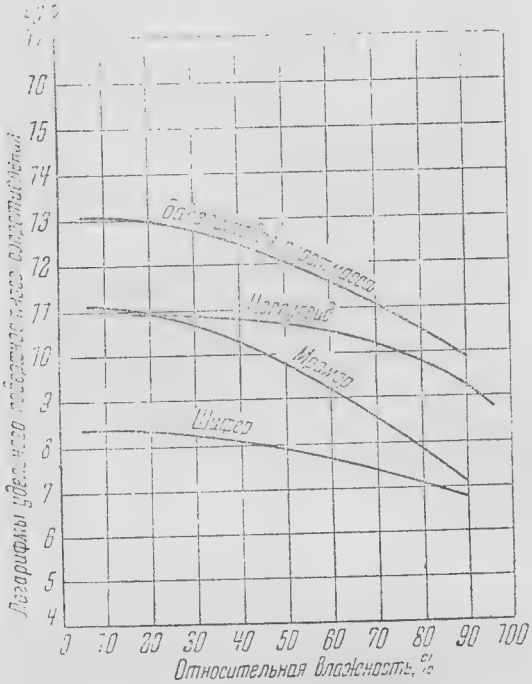


Рис. 66. Диэлектрики III группы с пористой структурой (по литературным данным).

стекла меньше, чем слюды. Это можно объяснять особенностями структуры микалекса, представляющего собой систему из частиц слюды, цементированных стеклом. Микалекс на влагостойком стекле ($\varepsilon = 8$) обладает очень большим поверхностным сопротивлением, приближающимся к сопротивлению церезина, и много большим, чем у пчелиного воска и галовакса.

§ 36. Влияние поверхностных покрытий на поверхностное сопротивление изоляторов

В заводской практике чаще всего стремятся защитить от действия влаги поверхность стекол, керамики и мика-

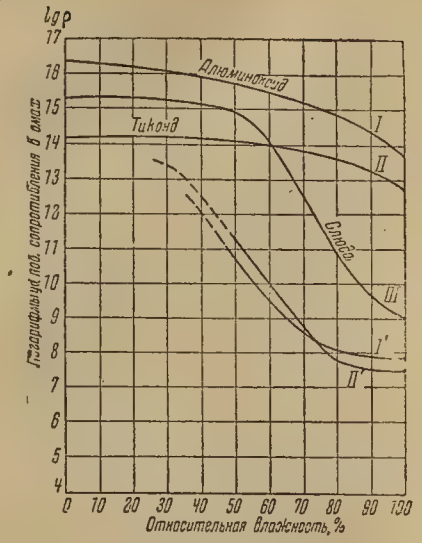


Рис. 67. Зависимость удельного поверхностного сопротивления от относительной влажности воздуха для керамики и слюды:
I—алюминоксид с очищенной поверхностью; I′—алюминоксид с неочищенной поверхностью; II—тиконд с очищенной поверхностью; II′—тиконд с неочищенной поверхностью; III—слюда мусковит; поверхность очищена.

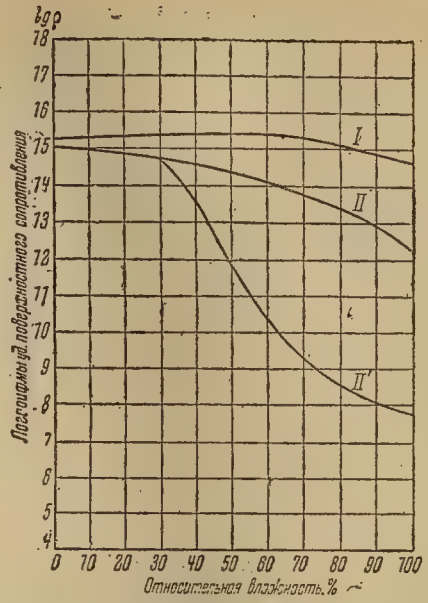


Рис. 68. Зависимость удельного поверхностного сопротивления от относительной влажности воздуха для микалекса:

I } микалекс с чистой поверхностью;
II }

II—микалекс с загрязненной поверхностью.

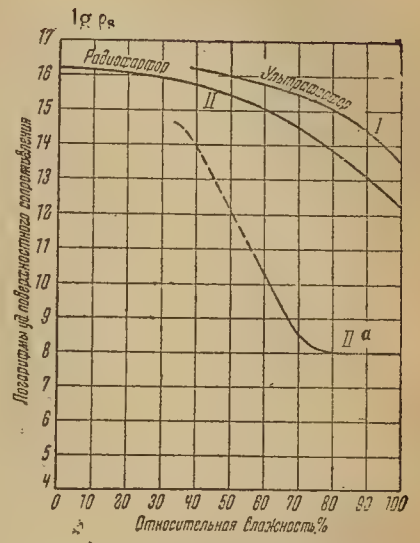


Рис. 69. Зависимость удельного поверхностного сопротивления от относительной влажности воздуха для радиофарфора и ультрафарфора.
I—ультрафарфор с очищенной поверхностью; II—радиофарфор с очищенной поверхностью; II^{а}—радиофарфор с неочищенной поверхностью.

лекса. Детали из микалекса подвергают проварке в парафине, церезине, галоваксе при температуре около 120°С в течение 2 — 2,5 часов. После проварки на поверхности образцов остается тонкий слой органического диэлектрика. Испытания этих образцов в 100% влажности показывают, что поверхностное сопротивление только непродолжительное время увеличивается по сравнению с первоначальным, непропитанным образцом, а затем становится хуже, чем у него. Иногда поверхность микалекса покрывают лаком, например, полистирольным. Тонкая пленка стирола прочно держится на поверхности микалекса. Однако, поскольку в тонких слоях пленка пориста, она не защищает образец от проникновения влаги. Более толстые пленки стирола неплотно держатся на микалексе; поэтому влага под действием капиллярных сил попадает на поверхность с торцов. Таким образом, в данном направлении нельзя получить положительных результатов.

Покрытие низковольтных керамических конденсаторов цветными органическими эмалями с целью защиты электродов от коррозии и для маркировки их не обеспечивает высоких значений поверхностного сопротивления во влажной среде, что приводит к необходимости герметизации конденсаторов в керамический кожух.

В самое последнее время показано, что применение химически-взаимодействующих с керамикой кремне-органических соединений дает весьма положительные результаты.

Можно сделать следующие основные выводы о механизме поверхностной электропроводности твердых непористых диэлектриков.

Зависимость электропроводности от влажности вызывается наличием на поверхности гигроскопичных и диссоциирующих на ионы веществ. Влага, адсорбируемая поверхностью, способствует их выявлению. Если эти вещества случайно попали на поверхность диэлектрика, то путем удаления их можно получить высокие значения поверхностного сопротивления при всех влажностях воздуха. Если эти вещества являются составной частью материала, то поверхностное сопротивление будет сильно зависеть от влажности.

Поверхностные покрытия диэлектриков с целью повышения их сопротивления нейтральными и слабополярными составами (парафином, восками) дают отрицательный результат. Вещества, химически взаимодействующие с основным веществом, например, кремний-органические соединения и керамика, повидимому, могут быть использованы для повышения влагостойкости изоляции.

Глава IX

МЕХАНИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

§ 37. Общие замечания

Обычно наблюдаемую на практике механическую прочность электроизолирующих материалов можно определить как техническую прочность, так как она значительно ниже теоретической прочности, свойственной веществу в силу его физической природы.

Было показано, что при специальных условиях опыта экспериментальные данные по механической прочности ряда тел близко совпадают с расчетными. Это относится как к кристаллическим веществам, так и к аморфным. Академик А. Ф. Иоффе, совместно с Кирпичевой и Левитской, показали, что каменная соль при разрыве ее под водой имеет прочность более 6.000 *кг/см*^{2}.

Эндерегг наблюдал прочность тонких стеклянных нитей при разрыве, доходящую до 3.700 *кг/см*^{2}. В то же время, стекло в виде массивных изделий имеет прочность на разрыв всего лишь 2—3% от теоретической, т. е. 100—200 *кг/см*^{2}.

Гриффис считает, что причиной низкой прочности стекла на разрыв являются трещинки на поверхности стекла. По Гриффису техническая прочность на разрыв определяется по формуле:

$$P=\sqrt{\frac{4\sigma E}{\lambda\pi(1+\mu)}}, \qquad (77)$$

где σ — поверхностная энергия,

E — модуль упругости,

μ — модуль Пуассона,

λ — длина самой большой трещинки.

А. П. Александров и С. Н. Журков связывают механическую прочность стекла с распределением неоднородностей по объему. При вытягивании нити обнажается часть неоднородностей, заключенных в стекле; вероятность того, что на поверхности окажутся именно опасные неоднородности тем меньше, чем меньше поперечное сечение.

Следует также отметить, что при испытании изоляторов большого сечения и в особенности в эксплоатационных условиях, к указанному выше явлению добавляется фактор неравномерного распределения нагрузки по сечению и возникновение местных перенапряжений от изгиба, скалывания и др.

§ 38. Механическая прочность технических диэлектриков

Различают материалы, характеризующиеся при обычных температурах и скоростях приложения нагрузки так называемым хрупким разрушением (керамика, стекла) и материалы с пластической деформацией (металлы, пластмассы).

Неорганические диэлектрики, отличающиеся хрупким разрушением, по структуре с точки зрения механической прочности, можно разделить на три группы:

I группа.—Кристаллические вещества с крупными порами или заметно выраженными плоскостями спайности (мрамор, тальковый камень, слюда, каменная соль).

II группа.—Стекла.

III группа—Кристаллостекла (фарфор, стеатит, алюминоксид).

Механическая прочность материалов I группы очень мала. Так, например, временное сопротивление на изгиб мрамора составляет всего лишь 100—200 *кг/см*². Прочность

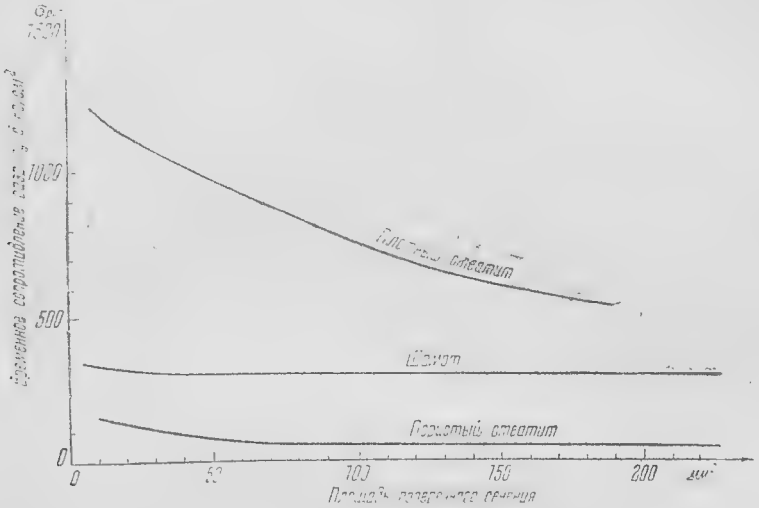


Рис. 70. Зависимость временного сопротивления на разрыв плотной и пористой керамики от площади поперечного сечения образца.

нормальных силикатных и боратных стекол больше, чем материалов предыдущей группы, но также незначительна. Согласно академику Гребенщикову, на поверхности стекла образуется (как в воде, так и в воздухе) гель кремневой кислоты; набухание этого геля в поверхностных трещинах резко снижает механическую прочность стекла.

Прочность плотных кристаллостекол, в частности керамики, обычно определяется соотношением аморфной и кристаллической фаз. У алюминоксида с резко выраженной мелкокристаллической структурой временное сопротивление на изгиб доходит до 3.000 *кг/см*² даже при больших сечениях; у фарфора, керамики с содержанием аморфной фазы до 60%, временное сопротивление на изгиб составляет всего лишь 400—600 *кг/см*².

На рис. 70 показано, что прочность пористой керамики значительно меньше, чем плотной, и временное сопротив-

ление на разрыв мало меняется при увеличении сечения образца. Напротив, удельная механическая прочность плотной керамики и стекла резко падает при возрастании площади сечения изделия, как отмечалось ранее. На рис. 71 приведены

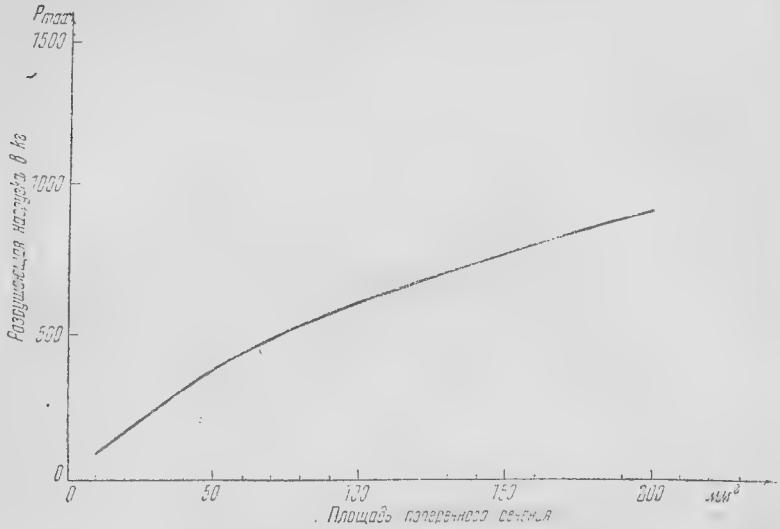


Рис. 71. Зависимость разрушающей нагрузки при разрыве от площади поперечного сечения образца для плотного стеатита.

кривые зависимости механической прочности от площади сечения для стеатита, а на рис 72 — временного сопротивления на разрыв от площади сечения для стекла пирекса.

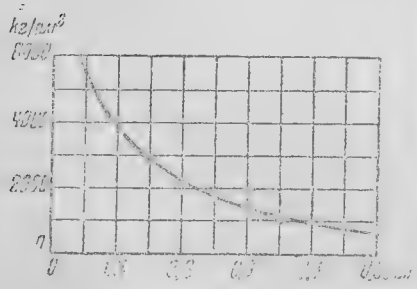


Рис. 72. Зависимость временного сопротивления на разрыв волокон из стекла пирекс от их диаметра.

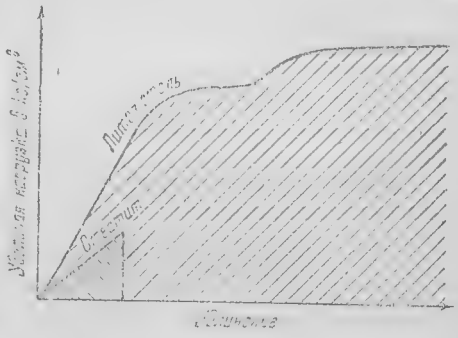


Рис. 73. Зависимость удлинения при растяжении от нагрузки для стали и стеатита.

Механическая прочность вещества связана с модулем упругости. На рис. 73 приведены кривые зависимости удлинения при растяжении от нагрузки для стеатита и литой

стали. Из рис. 73 следует, что у керамики предел упругости и временное сопротивление на разрыв почти совпадают.

Ниже приведены значения модуля нормальной упругости и временных сопротивлений при разрыве, сжатии и изгибе керамики и металла. Керамика имеет прочность при сжатии большую, чем некоторые металлы и уступает металлам по прочности при растяжении.

Механическая прочность металлов и керамики (в *кг/см²*)

Название материала	Модуль нормальной упругости	Временное сопротивление	
		на разрыв	на сжатие
Сталь	$2{,}1 \cdot 10^6$	5000—20000	—
Чугун	$(0{,}75-1{,}05)10^6$	1200— 3200	7000—8500
Стеатит	$(0{,}9-1{,}1)10^6$	550— 850	8500—9500
Дюралюминий . . .	$(0{,}65-0{,}75)10^6$	3800— 6000	—

Исключительно большое значение имеет при механической нагрузке степень равномерности распределения усилий по сечению изделия. Влияние шлифовки поверхности радиофарфорового изолятора на разрушающую нагрузку при испытании образцов на сжатие между стальными гладкими плитами можно видеть из следующих примеров. Для цилиндра диаметром 20 *мм* и высотой 25 *мм* при нешлифованной торцевой поверхности временное сопротивление сжатию составляют 1500—2000 *кг/см²*; в случае тщательно шлифованной поверхности оно доходит до 5500—6000 *кг/см²*. Для боченочного изолятора диаметром 200 *мм* и высотой 200 *мм* при нешлифованной поверхности временное сопротивление составляет 800—1000 *кг/см²*, а при тщательно шлифованной поверхности 2000—2500 *кг/см²*. Прокладки из прессшпана или мягкой меди не повышают разрушающих усилий, как это показывает опыт.

Ниже приводим данные о механической прочности технических диэлектриков неорганического и органического происхождения.

Временное сопротивление на изгиб технических диэлектриков (в *кг/см²*)

1. Неорганические материалы

а) Материалы с крупными порами:

мрамор . . . . . 100—150
талькохлорит . . . . . 200—250
пористая керамика . . . . . 300—400

б) Стекла и кристаллостекла с большим содержанием аморфной фазы:

стекло силикатно-щелочное	300—500
изоляторный фарфор	400—600
радиофарфор	500—700

в) Мелкокристаллические материалы с небольшим содержанием аморфной фазы:

тиконд	1200—1400
ультрафарфор	1200—1600
стеатит	1200—1600

2. Органические материалы

а) Полимер без наполнителя:

полистирол	600—1000

б) Прессованная пластмасса с наполнителем:

монолитовая пластмасса	500—800

в) Слоистые материалы

гетинакс	1000—1500
текстолит	1000—1300
фибра	1000—1200

ЧАСТЬ II

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА ДИЭЛЕКТРИКОВ

ВВЕДЕНИЕ

§ 39. Структура и энергия решетки

Как известно, диэлектрики подразделяются на нейтральные и полярные. Рассмотрим, как сказывается на электрических свойствах диэлектрика строение молекулы и структура вещества, на основании каких соображений, о полярности молекулы или о структуре, производится классификация диэлектриков и выбор высококачественных материалов.

Все нейтральные изоляторы отличаются высокими электрическими свойствами. Полярные диэлектрики в зависимости от структуры могут обладать резко различными электрическими свойствами.

Построенные из ионов кристалловидные диэлектрики обычно отличаются высокими электрическими свойствами благодаря значительным силам закрепления ионов в кристаллической решетке, независимо от того, состоит ли их вещество из галлоидных соединений, содержит ли оно, например, ионы щелочных металлов или молекулы воды.

Роль структуры вещества как фактора, определяющего электрические свойства, иллюстрируется опытом в работах П. П. Кобеко, описание которого мы приводим. При смачивании кристаллического сахара водой она пропитывает его поры и катастрофически повышает электропроводность, делая сахар практически проводником при температурах порядка 5—10° С. Тот же сахар, переохлажденный из расплава с 10% воды в том же температурном интервале обладает сопротивлением, большим 10^{14} *ом · см*.

Химический состав выражается стехиометрическими формулами, которые говорят о количественных соотношениях атомов в составе сложного вещества. На электрические свойства также влияют стереохимические данные. Послед-

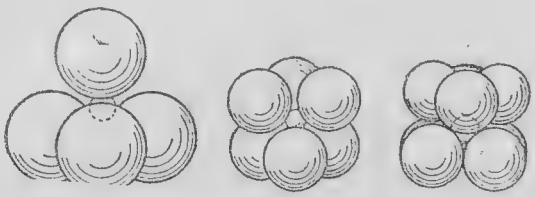


Рис. 74. Координация ионов в зависимости от размера их радиусов.

ние отражают энергетическое состояние системы. Для случая ионной кристаллической решетки энергия взаимодействующих зарядов, соответствующая минимально возможной, была вычислена Борном.

По Борну энергия грамм-молекулы кристаллического вещества

$$U = N\frac{a \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot q^2}{R}\left(\frac{n-1}{n}\right), \qquad (78)$$

где: z_1 и z_2 — валентности ионов;
R — сумма радиусов ионов;
q — заряд электрона;
n — показатель степени потенциала отталкивания.
N — число Авогадро;
a — константа решетки.

Энергия кристалла, рассчитанного Борном, относится к случаю идеально-равновесного процесса кристаллизации, когда оболочки ионов, условно принимаемые шарообразными, сближаются до взаимного касания и, в зависимости от соотношения радиусов и поляризационных свойств, образуют ту или иную координацию, отвечающую наиболее устойчивому равновесию зарядов.

На рисунках 74 и 75 показаны различные координации ионов, отвечающие условию их плотной упаковки.

В жидких диэлектриках тепловое движение преодолевает силы связи между отдельными молекулами, вследствие чего здесь может быть признан лишь статистический (ближ-

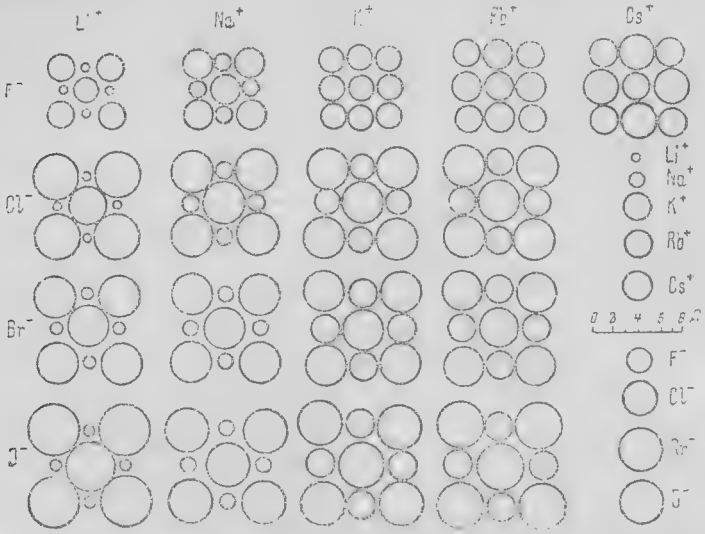


Рис. 75. Структуры типа NaCl при различных радиусах компонент.

ний) порядок структуры. Структуры стекол, молекулярные образования которых жестко фиксированы в пространстве,

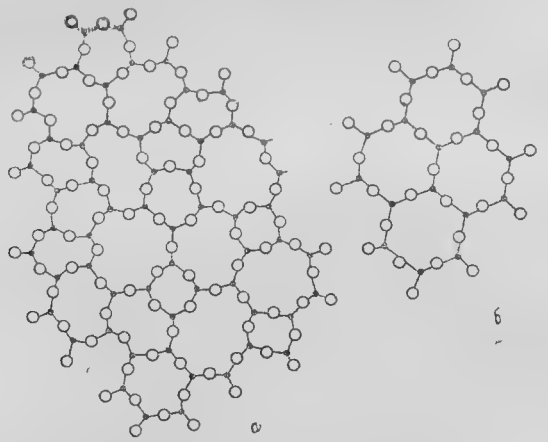


Рис. 76. Схематическое изображение: а) двухмерное стекло R_2O_3 по Зехериессену; б) решетка двухмерного кристалла R_2O_3 по Зехериессену.

но не периодичны, занимают промежуточное, переходное положение между истинными кристаллами и жидкостями.

На рис. 76 (а и б) дано схематическое изображение двухмерного кристалла типа R_2O_3 и двухмерного стекла того же состава по Зехериессену. Как видно из чертежа, в кристалле имеется только один общий для всего кристалла тип элементарной ячейки, в стеклах же возникает набор $R_n O_m$ связей, отличающихся различной энергией диссоциации.

В стеклах сложного состава, содержащих в частности одновалентные щелочные ионы, в пространственной сетке следует ожидать разрывов, т. к. одновалентные ионы вступают во взаимодействие лишь с одним чужим ионом, а химическое соединение с образованием в стекле определенного типа кристаллитов возникает далеко не всегда. Таким образом предопределяются места неплотной упаковки решетки, где возможны локальные перемещения слабо связанных ионов под действием тепловой энергии и электрического поля.

§ 40. Кристаллизация и стеклообразование

При переходе от одного агрегатного состояния к другому, от газообразного к жидкому, а затем к стеклообразному и кристаллическому, наблюдается увеличение компактности расположения молекул. Известны два процесса превращения вещества из жидкого или газообразного состояний в твердое—кристаллообразование и стеклообразование. Трудно отдать предпочтение тому или другому направлению как термодинамической закономерности, так как можно считать доказанным, что процессы полимеризации молекул при стеклообразовании ведут к уменьшению внутренней свободной энергии не в меньшей мере, чем процессы кристаллизации. Именно поэтому стекло заняло прочное и вполне самостоятельное место в ряде агрегатных состояний вещества. В то же время, ни кристаллизацией, ни стеклообразованием практически нельзя получить идеальную структуру диэлектрика.

Кристаллы,—вещества, отвечающие вполне определенным химическим формулам, не удовлетворяют условию трехмерной непрерывности, характеризуются бесчисленным множеством плоскостей спайности, где высаживаются примеси, или ослабленностью связей зарядов (рыхлостью решетки) хотя бы в одном направлении.

Стекла—вещества, по самой природе своей отличающиеся неопределенностью молекулярных связей. Порожденное процессами полимеризации и ассоциации молекул внутреннее трение (вязкость стекла) преждевременно останавливает развитие этих процессов; молекулярные группы стекла ока-

зываются в термодинамически неустойчивом равновесии, с заметным запасом потенциальной энергии.

Можно рассматривать стекло как вынужденное неестественное состояние твердого тела, задержанного в своем стремлении к нормальной кристаллизации. Можно рассматривать стекло, и это нам кажется правильнее, как вполне закономерное высокомолекулярное тело с аномально высокими значениями удельного объема и запаса внутренней энергии. Незавершившиеся так или иначе в тепловой истории стекла химические и структурные превращения определяют недостаточность межмолекулярных электрических сил.

Даже не содержащие примесных легкоподвижных щелочных ионов стекла имеют при высоких частотах диэлектрические потери большие, чем у кристаллов. Сюда относятся как сложные технические стекла, так и элементарные расплавы, как например, борный ангидрид. Если во многих чистых кристаллах диэлектрические потери при любой частоте рассчитываются по значению электропроводности, то в стеклах резко выражены структурные потери, и лишь при весьма значительных температурах расчет потерь производится на основании данных электропроводности.

§ 41. Классификация диэлектриков

Расчет энергии диссоциации гетерополярного кристалла, выполненный Борном, является первой попыткой предвычислить фундаментальную функцию—критерий равновесия системы. Расчет этот не является общим. В частности в нем не принимается во внимание диэлектрическая проницаемость среды, ослабляющая внутреннее поле при переходе иона из нормального положения в ряд других положений в решетке. Если ввести необходимые поправки, оказывается, что для значительного количества кристаллов предвычисленная энергия и полученная опытным путем из уравнения электропроводности близко совпадают. Дальнейшее изучение электрических свойств диэлектриков связывается с необходимостью все более глубокого расчета энергетических констант для самых различных структур вещества.

Следовало бы при классификации полярных диэлектриков по электропроводности и диэлектрическим потерям исходить из энергетических констант. Однако, в настоящее время имеется слишком мало данных о таких константах. В связи с этим в основу классификации ставят характер структуры.

Большинство кристаллических диэлектриков, в частности содержащая конституционную воду слюда, или, например, кристаллическая глюкоза, имеют очень малый угол потерь.

Известен, однако, ряд кристаллических изоляторов, у которых наблюдаются большие диэлектрические потери. Сюда относится лед, молекулярная структура которого показана на рис. 77. В кристалле льда каждый атом кислорода замыкается в тетраэдр из четырех атомов водорода, а каждый атом водорода в свою очередь имеет около себя по два атома кислорода с каждой стороны. Эта наиболее рыхлая, наиболее „пористая" кристаллическая структура имеет наименьшее возможное в кристалле координационное число, так как числом 2 — 1 характеризуется уже изолированная молекула воды. Удельный объем льда на 8% превышает удельный объем воды. Структурные диэлектрические потери в нем резко выявлены.

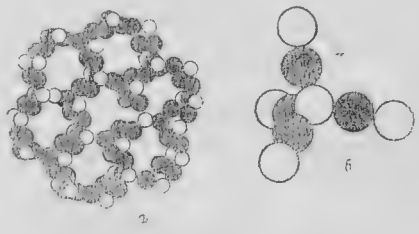


Рис. 77. Структура льда:
а—модель кристалла; *б*—взаимное расположение атомов.
Белые шарики—кислородные атомы; черные—водородные атомы.

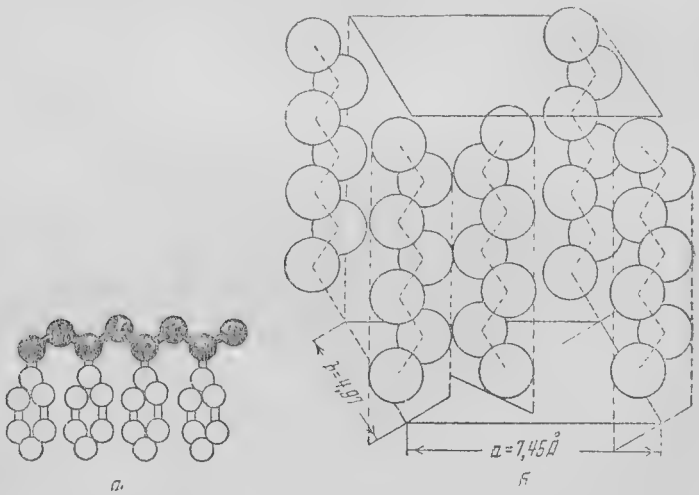


Рис. 78. Молекулярная структура слабополярного диэлектрика.
а—строение молекулы полистирола; *б*—решетка парафина.

Аморфные диэлектрики не обладают структурной поляризацией только в том случае, когда они неполярны. Молекулярная структура слабополярного диэлектрика — полистирола и полярного диэлектрика — глюкозы приведены на рисунках 78 и 79.

В свете изложенных представлений о структуре и потерях диэлектриков можно наметить следующую классификацию их по признаку особенностей структуры и виду поляризации в электрическом поле.

1. Диэлектрики с электронной поляризацией, нейтральные и слабополярные, кристаллические и стеклообразные, жидкие и газообразные (например, парафин, полистирол, сера, бензол).

2. Диэлектрики с электронной и ионной поляризацией. В эту группу входят преимущественно кристаллические ди-

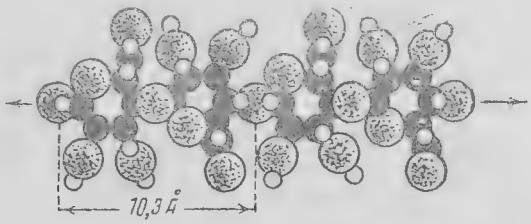


Рис. 79. Структура молекулы глюкозы.

электрики с плотной упаковкой ионов, например, кварц, слюда, гипс, алюминоксид, мрамор и др.

3. Диэлектрики, отличающиеся структурной поляризацией. В эту группу входят органические и неорганические стекла и кристаллостекла (бакелит, аморфная глюкоза, целлюлоза, пластмассы термореактивные, фарфор, микалекс, силикатные и боратные стекла) и кристаллические диэлектрики с неплотной упаковкой молекул или ионов в решетке (лед, кристаллическая HCl).

4. Вязкие и жидкие диэлектрики, характеризующиеся дипольной поляризацией, например, канифольные компаунды, касторовое масло, совол.

5. Сегнетэлектрики, характеризующиеся спонтанной поляризацией.

В заключение еще раз отметим, что структура вещества предопределяет диэлектрические потери и электропроводность технических диэлектриков лишь постольку, поскольку мы не считаемся с примесями; однако, действие примесей в свою очередь проявляется по разному, в зависимости от вида структуры.

Глава X

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДИЭЛЕКТРИКАХ

§ 42. Общие замечания

Кристалловидные неорганические диэлектрики благодаря своим высоким механическим и электрическим свойствам

представляют большой технический интерес как наиболее качественные электроизолирующие материалы.

Особенностью диэлектриков-монокристаллов является наличие поверхностей раздела (плоскостей спайности), отчетливых или едва обнаруживаемых; поликристаллические диэлектрики характеризуются наличием пор и капилляров, закрытых или сообщающихся друг с другом. Пористая керамика или пористые горные породы могут отличаться очень малыми диэлектрическими потерями (мрамор). Однако, положение совершенно меняется, когда на поверхностях раздела высаживаются примеси посторонних веществ, ионных или электронных полупроводников.

Простейший случай, когда элементарные кристаллообразования разделены системой капилляров, и примесью оказывается влага, был рассмотрен нами ранее в разделе о механизме гигроскопичности твердых диэлектриков. Там было показано, что поглощение влаги, а следовательно, примесные диэлектрические потери, обусловленные влагой, определяются соотношением размера пор и размера молекулы или молекулярного комплекса, проникающего в поры вещества. Была также дана классификация капилляров по признаку их размеров.

В промышленной и лабораторной практике устранение пористости неорганических высокочастотных изоляторов считается элементарной и как бы предварительной задачей. Основная трудность при промышленном изготовлении кристалловидных диэлектриков состоит в устранении влияния примесей полупроводников, входящих в состав исходного сырья. Чем выше качество синтезируемого материала, чем более совершенными должны быть его электрические характеристики, тем разительнее сказываются интеркристаллические примеси, причем даже абсолютные значения диэлектрических потерь могут не падать, а возрастать. Так, например, широко применяемые в радиопромышленности кристалловидные диэлектрики—микалекс, специальная керамика, обнаруживают наиболее неблагоприятные электрические показатели именно при тех соотношениях исходного сырья, которые обеспечивают наилучшие результаты, когда исключены примеси. Потери за счет примесей широко встречаются и в ряде других кристалловидных диэлектриков как неорганических, так и органических. Так, например, сера часто оказывается непригодной вследствие загрязнения посторонними примесями, а органический диэлектрик—парафин приобретает повышенные потери в результате загрязнения продуктами окисления.

Диэлектрические потери от примесей характеризуются неопределенными, невоспроизводящимися в различных партиях материала и на различных образцах, значениями $\mathrm{tg}\delta$

и температурной зависимостью его, отвечающей крутой экспоненте, а иногда дающей причудливую кривую с максимумом при определенной температуре.

На рисунках 80 и 81 приведены температурные зависимости угла потерь микалекса и алюминоксида образцов, где примеси проявляются и где они нейтрализованы.

Механизм потерь за счет примесей различен, в зависимости от природы примеси. В случае примесей—ионных или дипольных веществ — механизм потерь в основном поляризационный. В случае примесей—электронных полупроводни-

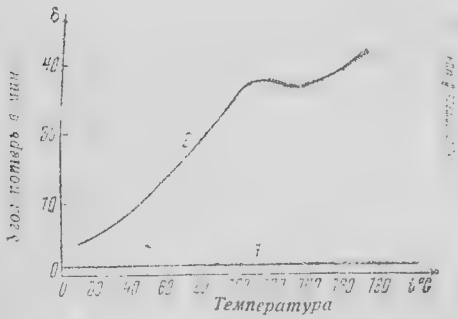


Рис. 80. Температурная зависимость угла потерь двух образцов алюминоксида при $f = 1 \cdot 10^6$ *гц*
1—нормальный образец; 2—образец с примесными диэлектрическими потерями.

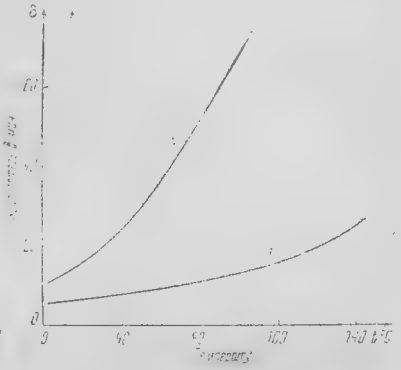


Рис. 81. Температурная зависимость угла потерь двух образцов микалекса при $f = 1 \cdot 10^6$ *гц*
1—нормальный образец; 2—образец с примесными диэлектрическими потерями.

ков потери определяются электропроводностью примеси. Однако и здесь экспериментально измеренная при постоянном напряжении величина электропроводности диэлектрика не объясняет высоких значений примесных потерь, так как удельное объемное сопротивление на много порядков больше, чем рассчитанное на основании формальной теории. Рисунки 82 и 83, где нанесены температурные зависимости электропроводности и угла потерь образцов алюминоксида, нормальных и с примесными потерями за счет электронных полупроводников, иллюстрируют выше сказанное. Как видно из графиков, электропроводности „аномального" и обычного образцов алюминоксида практически не отличаются, в то время, как значения угла потерь резко различны.

Полупроводящие окислы выкристаллизовываются в межкристаллитных прослойках в свободном и полусвободном состояниях. При переменном напряжении, в особенности на высокой частоте, всегда могут образоваться неблагоприятные последовательно-параллельные включения сопротивлений и

емкостей (элементарных кристалликов). Самые ничтожные количества примеси, расположенные таким образом, скажутся на диэлектрических потерях, но вопрос об абсолютном значении их решается в каждом отдельном случае, в связи со структурным строением диэлектрика. Наиболее вероятное

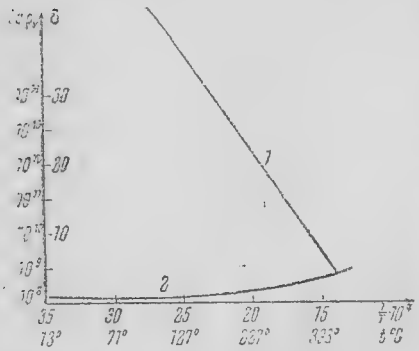


Рис. 82. Зависимость удельного объемного сопротивления и угла потерь нормальных образцов алюминоксида. 1—удельное объемное сопротивление; 2—угол диэлектрических потерь при $f = 1 \cdot 10^6$ *гц*.

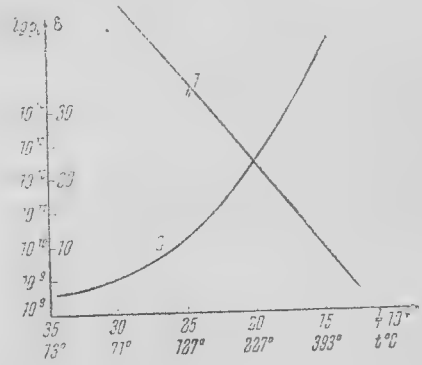


Рис. 83. Зависимость удельного объемного сопротивления и угла потерь образца алюминоксида, загрязненного примесями.
1—удельное объемное сопротивление; 2—угол диэлектрических потерь.

толкование потерь, обусловленных электронными полупроводниками, сводится к старым максвелло-вагнеровским представлениям о неоднородном диэлектрике.

§ 43. Примеси в кристаллических диэлектриках

Из примесей, получивших самое широкое значение в технологии неорганических высокочастотных диэлектриков, необходимо выделить две группы металлических окислов:

1. Железистые окислы, окислы титана и др. (электронные полупроводники).

2. Щелочные окислы (ионные соединения).

В зависимости от структуры диэлектрика, от соотношения содержания в нем кристаллической и стекловидной фазы, та или другая из этих примесей выдвигается на первый план и снижает качество изолятора.

Ничтожно малые количества посторонних примесей, представляющих собой окислы II, III и других групп таблицы Менделеева, в отдельных случаях также резко сказываются на диэлектрических потерях поликристаллических диэлектриков, деформируя их структуру, как это наблюдается в случае титанатов бария. Вопрос этот изучается в настоящее время.

На диэлектрических потерях диэлектриков с преимущественным содержанием кристаллической фазы в первую очередь сказывается влияние примесных электронных полупроводников. Если эти примеси исключены или нейтрализованы, диэлектрические потери будут определяться щелочесодержащей стекловидной фазой, введенной часто в ничтожных количествах в межкристаллитные прослойки, и играющей обычно положительную роль для механического закрепления системы.

Неорганические диэлектрики представляют собой или минералы или продукты промышленной переработки минерального сырья. Загрязненность нерудных ископаемых железистыми окислами оказывается причиной пониженных электрических показателей промышленных кристалловидных изоляторов или существенно осложняет их технологию.

Примесные железистые окислы—низшие формы окисления металла, не отвечающие его основной валентности FeO, Fe_3O_4. Все они полупроводники с удельным сопротивлением от единиц до сотен *ом·см*. В минеральном сырье, как правило, содержится целая гамма железистых окислов от низших форм до высшего окисла Fe_2O_3, отвечающего основной валентности. В этой связи должно стать понятным влияние газовой среды на электрические свойства диэлектриков, подвергающихся тепловой обработке при высоких температурах (кристалловидная керамика, микалекс). Изменением состава газовой среды можно обращать реакции газа с примесными окислами в нужную нам сторону и получать достаточно благоприятные электрические показатели.

В общем случае, поскольку вопрос касается электронных полупроводников, не только железистые окислы, но многие другие металлические окислы (некоторые из них, например, TiO_2, часто встречаются в минеральном сырье или являются основным сырьем) при обжиге переходят в формы окисления, не отвечающие основной валентности металла.

Ниже приведены данные об электропроводности ряда металлических окислов до и после обжига в восстановительной среде.

Электропроводность окислов *(в ом$^{-1}$·см$^{-1}$)*

Название окисла	До обжига	После обжига	Возможные формы окисления после обжига
Fe_2O_3	$< 10^{-12}$	$> 3{,}5$	FeO; Fe_3O_4
TiO_2	10^{-12}	$> 5{,}0$	TiO; Ti_2O_3
ZnO	$< 10^{-12}$	$> 4{,}0$	Zn_2O_2 (цинкат цинка)
UO_3	$< 10^{-6}$	$> 10{,}0$	UO_2; U_2O_5
WO_3	$< 10^{-5}$	$> 5{,}5$	WO_2

Большой экспериментальный материал о примесях в неорганических кристалловидных изоляторах получен в результате работ по изысканию керамических изоляторов (радиофарфора, ультрафарфора, тиконда, алюминоксида), микалекса), материала высокого сопротивления, карбокерамического сопротивления — керакса.

Сюда можно причислить данные о некоторых минеральных породах, поликристаллических и монокристаллах (слюды, кварца, мрамора).

§ 44. Нейтрализация примесей

Выбор чистого сырья, свободного от железистых, щелочных окислов и других—не решает полностью задачу элиминирования примесей. Использование такого сырья часто оказывается нереальным вследствие затруднений, возникающих при добыче сырья на отдаленных базах, а также и ввиду отсутствия источников достаточно чистого сырья. Очистка сырья не всегда возможна и не всегда дает требуемую степень чистоты, которая оправдала бы затраты на очистку. Тем не менее, требования к чистоте сырьевых материалов высокочастотных диэлектриков являются совершенно обязательными.

Вопрос о нейтрализации примесей решается по разному, в зависимости от того, являются ли они щелочными или электронными полупроводниками. Примесные диэлектрические потери за счет электронных полупроводников в кристаллах тем меньше, чем полнее разобщены между собой примеси. Наоборот, в стеклах с целью снижения потерь за счет щелочных окислов следует добиваться наиболее плотной упаковки структуры, вводить тяжелые окислы,—на чем мы подробнее остановимся ниже.

Газовая среда при обжиге керамики устанавливается из соображений о внешнем виде изделий (белый цвет поверхности можно получить лишь при нейтральной или слабовосстановительной газовой среде в конце обжига), а также из соображений о температуре спекания изделий. При восстановительной газовой среде в конце обжига железистые окислы не переходят в высшие формы, и образующаяся закись железа FeO служит флюсом, способствующим в ряде случаев процессу спекания. Электрические свойства изделия часто становятся в противоречие с названными физическими процессами.

Наиболее эффективное решение вопроса о нейтрализации железистых окислов заключается в предельном разобщении их между собой. Это может быть осуществлено по разному.

1. Выбором гранулометрического состава сырья достаточно тонкого для того, чтобы в процессе термической

обработки материала произошло самопроизвольное обогащение системы стекловидной фазой; последняя распределяется в межкристаллитных прослойках, захватывает примесь внутрь своих комплексов, резко снижает этим концентрацию примеси.

2. В состав кристалловидного диэлектрика специально вводится избыточное количество стеклообразующих компонент. Для того, чтобы получить вполне устойчивые значения диэлектрических потерь изолятора в разных партиях, целесообразным оказывается даже увеличение содержания щелочных окислов, которые уменьшают вязкость стекла при высоких температурах. Диэлектрические потери при этом в конечном счете несколько возрастают, однако, такое усиление состава стекловидной фазой все же оправдывается.

По мере увеличения в системе кристалл—стекло содержания стекловидной фазы примесные железистые окислы теряют значение, и диэлектрические потери при всех обстоятельствах вызываются щелочными окислами (например, в случае изоляторного фарфора, радиофарфора).

В III части книги мы вернемся к вопросу о примесях при рассмотрении технологических процессов изготовления неорганических изоляторов. Отметим здесь, что качественные диэлектрики с малыми потерями, выпускаемые в настоящее время промышленностью, имеют диэлектрические потери при радиочастотах, разнящиеся в отдельных партиях материала, в зависимости от абсолютной величины, до 1,5—2 раз. В случае керамических диэлектриков с большим содержанием аморфной фазы такое колебание угла потерь объясняется влиянием щелочных окислов, в случае диэлектриков с большим содержанием кристаллической фазы — микалекса, ультрафарфора,—влиянием электронных полупроводников в межкристаллитных прослойках и аморфной фазы, обладающей заметными структурными диэлектрическими потерями.

Глава XI

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ И СТРУКТУРА НЕОРГАНИЧЕСКИХ СТЕКОЛ

§ 45. Представления о строении стекла

Стекло называют аморфным изотропным диэлектриком. Считается, что по отношению к стеклам не имеет смысла говорить о примесных окислах, так как эти примеси не нарушают общей картины строения при плавлении вместе с основными компонентами. Наконец, дается определение стекла как сплава стеклообразующих окислов SiO_2, B_2O_3

с окислами металлов Na_2O, CaO, PbO, BaO и другими. Эти воззрения на стекло не помогают разобраться в его электрических особенностях.

Рассмотрим физико-химическую природу стекла в связи с его электрическими свойствами, в частности, диэлектрическими потерями. Данные химического анализа стекла или данные пересчета шихты стекла на весовые соотношения окислов, конечно, ничего не говорят о том, какие соединения существуют в самом стекле, какова молекулярная структура стекла. Взгляд на стекло как на простое химическое соединение, существовавший вплоть до конца прошлого века, также неправилен, как и противоположная крайность в определении стекла как раствора химически-нейтральных компонент, подчиняющихся закону аддитивности свойств.

Согласно современным представлениям, неорганическое стекло—твердое тело, которое возникает за счет процессов полимеризации хотя бы одного из составляющих окислов, причем остальные окислы присоединяются к молекулам полимера и образуют совместно с ними набор элементарных ячеек решетки стекла. С этой точки зрения можно дать определение и понятию стеклообразующего окисла. Стеклообразующими мы можем назвать только те окислы, которые непосредственно склонны к процессу полимеризации (как это имеет место в случае SiO_2 или B_2O_3). Ионы двухвалентных металлов способны лишь присоединяться к высокополимеризованному комплексу. Ионы щелочных металлов наиболее слабо связаны с силикатным или боратным комплексами. Такое химическое и структурное соотношение щелочных окислов к остальной фазе стекла позволяет рассматривать их в большинстве случаев как примесь в неорганическом стекле, что находит себе подтверждение в приведенных ниже результатах исследования диэлектрических потерь неорганических стекол.

С точки зрения физических свойств стекла наиболее интересной, наиболее важной его особенностью является эволюционный, монотонный переход от твердого к жидкому состоянию. Известно, что в отличие от кристаллов стекла имеют растянутый интервал размягчения, который ограничивается, с одной стороны, температурой T_g, когда стекло теряет (или приобретает) свойство хрупкости, а с другой стороны,—температурой T_f, при которой из стекла уже можно вытягивать нити. Существует ряд гипотез о причинах этой особенности стеклообразного состояния, которые в сущности сводятся к развитию взглядов на внутреннее строение стекла. Согласно структурно-координационной теории, развитой Зехериессеном, а также Уорреном, в силикатном стекле основной структурной конфигурацией являются

SiO_4—тетраэдры. Если в расплаве имеются отдельные SiO_2 и SiO_3—цепочки и обрывки—Si—O—радикалов, то в твердом стекле эти обрывки химически связываются, в результате чего образуется каркас из беспорядочно расположенных SiO_4—тетраэдров, в „пустотах" между которыми размещаются катионы. Механизм сцепления заключается в том, что ненасыщенные односторонние связанные атомы кислорода, принадлежащие одной Si—O группе, передаются в общее пользование с соседними группами, с образованием в местах сцепления SiO_4 конфигурации. Процесс носит полимеризационный характер с возникновением химических связей, однако, щелочные окислы не входят в основной скелет стекла.

Растущие при охлаждении стекла комплексы не являются ограниченными индивидами, они взаимно переплетаются между собой и переходят один в другой.

При нагревании стекла сначала разрываются слабо связанные полимерные цепочки, а затем, по мере увеличения тепловой энергии, диссоциируют ячейки с более высокой энергией закрепления. Таким образом в стеклах плавление растягивается в известном интервале температур, тогда как в кристалле все связи разрываются при одной определенной температуре.

§ 46. Диэлектрические потери в неорганических стеклах

Главным фактором, определяющим диэлектрические потери неорганических стекол, является то или иное сочетание составляющих окислов, поскольку оно влияет на структуру стекла. Наличие щелочных окислов в стекле вызывает наиболее сильное снижение электрических свойств; однако, количество щелочей не предопределяет электрических характеристик стекла.

На основании изучения силикатных стекол можно сделать следующие выводы об их электрических свойствах:

1. С точки зрения диэлектрических потерь наилучшим из известных стекол является чисто кварцевое стекло (плавленный кварц). Пути получения стекла с облегченной технологией, приближающегося по свойствам к плавленному кварцу, в настоящее время неясны.

2. Стеклами, по электрическим свойствам больше всего приближающимися к кварцу, хотя и значительно уступающими ему, являются бесщелочные. При высоких частотах они характеризуются в основном структурными потерями.

3. Стекла, содержащие значительные количества тяжелых окислов при наличии в них небольших количеств щелочных окислов, имеют структурные потери, близкие к бесщелочным стеклам.

4. Силикатные стекла, содержащие калиевые окислы без тяжелых окислов или с небольшим содержанием их, имеют повышенные структурные потери.

5. Силикатные стекла, содержащие как окислы калия, так и натрия, могут иметь потери как бо́льшие, так и меньшие, чем в предыдущем случае, ввиду так называемого „нейтрализационного" эффекта.

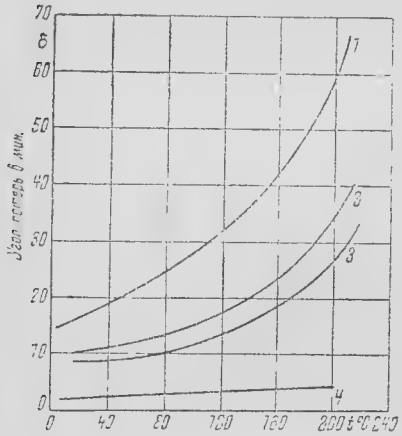


Рис. 84. Зависимость угла диэлектрических потерь оптических и электротехнических стекол от температуры.
1 — стекло № 46-с; 2 — пирекс; 3 — стекло № 23; 4 — минос.

6. Силикатные стекла, содержащие окислы натрия без калиевых окислов, имеют весьма большие структурные потери, потери сквозной электропроводности в этих стеклах выявляются уже при сравнительно низких температурах.

На рис. 84 приведены зависимости угла диэлектрических потерь некоторых оптических и электротехнических стекол от температуры.

Сравнивая стекло № 46-с и нормальный пирекс со стеклом № 23, мы видим, что первые два несмотря на небольшие количества содержащейся в них Na_2O (около 5%), имеют значительно большие потери, чем стекло № 23, содержащее вдвое большее количество Na_2O. Температурный рост угла потерь в стеклах № 46-с и пирексе также значительно больше, чем у стекла № 23. Объяснение этому следует искать в том, что стекло № 46-с и пирекс не содержат K_2O, в то время, как в стекле № 23 имеется 7% K_2O, помимо Na_2O. Наличие K_2O ослабляет вредное влияние на электрические свойства окислов Na_2O. Содержание в стекле только ионов калия менее опасно, чем ионов натрия. Стекло № 46-с содержит всего 6,2% Na_2O, стекло № 7 содержит 18,6% K_2O, тем не менее диэлектрические потери стекла № 46-с заметно больше, чем стекла № 7.

Добавление к щелочным стеклам окислов тяжелых металлов PbO и BaO повышает электрические свойства, при том же содержании щелочей. Поэтому стекло минос при наличии в нем Na_2O и K_2O имеет очень низкие потери.

Структурные потери, резко выраженные в неорганических стеклах при высоких частотах, при низких частотах малы. Наоборот tgδ за счет сквозной электропроводности стекол особенно заметен при низкой частоте.

Представляет интерес, что до настоящего времени в неорганических стеклах экспериментально не обнаружен ориентационный максимум угла потерь. Это можно объяснять, повидимому, тем, что максимум этот должен быть размытым, ввиду хаотического расположения ионов среди хаотически расположенных элементарных ячеек стеклообразующих окислов с близкими, но различными постоянными времени.

Характер термической обработки стекла — отжиг или закалка—существенно влияет на величину структурных

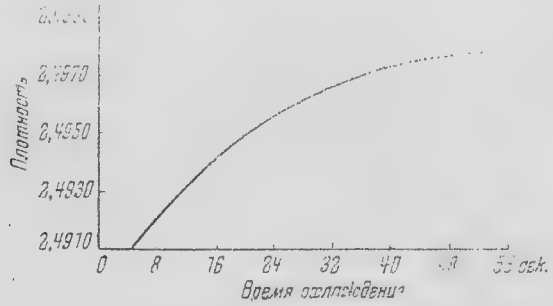


Рис. 85. Влияние закалки на плотность стекла (температура предварительного нагрева 900°).

потерь. Закаленное стекло, как это видно из рис. 85, имеет пониженную плотность по отношению к отожженному и в связи с этим бо́льшие диэлектрические потери.

Приводим зависимость угла диэлектрических потерь при частоте $f = 1 \cdot 10^6$ *гц* от способа термической обработки; эти данные убедительно показывают, насколько резко потери зависят от структуры стекла.

Зависимость угла диэлектрических потерь от способа обработки стекла

Способ обработки	Угол потерь в минутах	
	Стекло 65	Стекло 43-а
Нормальный горшковый отжиг	25	4
Длительный отжиг при низкой температуре с последующим быстрым охлаждением . .	28	5
Кратковременный отжиг при высокой температуре с последующим быстрым охлаждением	35	5
Закалка	43	7

Влияние термической обработки заметно сказывается только при значительных внутренних напряжениях в стекле. Основным же фактором, определяющим электрические свойства нормальных стекол, является химический состав, обусловливающий ту или иную структуру стекла. Решающую роль в возникновении определенной структуры играет соотношение размеров ионных радиусов компонент и их поляризационные свойства.

ЧАСТЬ III

СВОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что характеристики электрической аппаратуры зависят от качества выбранной электрической изоляции. Однако излишние, неиспользуемые практически запасы качества (запасы прочности), в подавляющем большинстве случаев ведут к нецелесообразному удорожанию аппаратуры. Нерациональный выбор материала может необоснованно задерживать выпуск деталей или даже сделать их дефицитными.

В связи с указанным, в каждой области электротехники применяются только определенные группы диэлектриков. Ниже показано какими материалами располагают отдельные отрасли электропромышленности. В тех случаях, когда в одном и том же устройстве используется целый ряд частот и значений напряжений (такое положение всегда имеет место в высокочастотных устройствах), следует классифицировать имеющиеся электрические цепи и на основании такой классификации производить выбор материалов.

Области применения различных видов электроизолирующих материалов

Назначение	Наименование материала
1. Сильноточная низковольтная техника	
Осветительная сеть, цепи электродвигателей, нагревательная, электросварочная аппаратура.	Штампованный (пористый) фарфор, талькохлорит, мрамор, шифер, дешевые пористые пластмассы (монолит, карболит), волокнистая изоляция, резиновая, хлорвинильная изоляция проводов, лаки.
2. Слаботочная низкочастотная техника	
Телефония, телеграфия, автоматика, сигнализация, измерительная аппаратура.	То же, что в п. 1, а также плотный изоляторный фарфор, эбонит.

Назначение	Наименование материала
3. Сильноточная высоковольтная техника	
Линии передач, электромашины, высоковольтная аппаратура, электротранспорт.	Плотный изоляторный фарфор, минеральное масло, пропитанная бумага, резина. Для внутренних устройств применяются пористые гигроскопичные материалы (гетинакс, прессшпан) с большими диэлектрическими потерями.
4. Слаботочная высокочастотная техника	
Радиоприемная аппаратура, задающие генераторы передатчиков, пеленгаторная, локаторная, телевизионная, измерительная аппаратуры. Высокочастотная телефония.	Рекомендуются материалы с малыми диэлектрическими потерями негигроскопичные, со стабильными характеристиками—радиокерамика, радиоэбонит, бакелит, полистирол, полиэтилен.
5. Высоковольтная высокочастотная техника	
Мощные радиостанции, генераторы для печей высокой частоты, радиолокационные устройства.	Возможно применение диэлектриков только с малыми потерями, негигроскопичных теплостойких, с высокой электрической прочностью (радиофарфор, ультрафарфор, микалекс, конденсаторная керамика).

Из приведенных данных видно, что наиболее качественные и дорогие материалы применяются в высокочастотной технике и, в особенности, в высокостабильной радиоаппаратуре и высоковольтной высокочастотной технике.

Если при выборе материалов для радиоприемной аппаратуры мы руководствуемся соображениями о чувствительности контура, устойчивости частоты, габаритах, то в мощных высокочастотных устройствах приходится считаться с возможностью возникновения короны на поверхности изоляции, поверхностного разряда или даже факельного свечения. Таким образом, от материала требуются не только малые диэлектрические потери, высокая механическая прочность, неизменяемость свойств с течением времени (отсутствие старения), но и негорючесть. Из неорганических материалов, которые единственно здесь могут применяться, в наибольшей степени этим требованиям удовлетворяет керамика.

Поиски материала для качественной электротехнической детали, лет 10—15 назад начавшиеся среди пластических

масс и среди керамических материалов, выявили решительные преимущества последних. Объясняется это не только высокими и разносторонними электрическими свойствами, которыми обладает керамика, но и дешевизной ее, простотой керамического сырья, гибкой технологией, рассчитанной на массовый выпуск самых разнообразных по конфигурации изделий. Существенный на первый взгляд недостаток керамики, ее высокая твердость, не позволяющая производить механическую обработку готовых деталей, является, как показывает опыт, несерьезным. При современном массовом производстве механическая обработка каждой отдельной детали все равно неприемлема; в сборку должны поступать готовые детали так же, как их дает промышленность пластических масс.

Наоборот, до обжига по отношению к керамике применяются все те методы обработки, которые приняты при обработке металла. Керамическую заготовку обтачивают на токарных станках, сверлят, фрезеруют, дают винтовую нарезку с помощью обычных резцов. Кроме того так же, как и в случае металла, широко практикуется получение готовых керамических деталей путем прессовки и штамповки (до обжига), причем профиль таких деталей может быть много сложней, чем металлических.

Керамика отличается неизменяемостью свойств при длительном воздействии температуры, влажности и многих химически активных веществ; она не стареет и не обнаруживает остаточных деформаций в противоположность пластмассам и другим органическим изолирующим материалам. Свойства керамики в свете современных представлений о диэлектриках могут быть в значительной степени предопределены. При соответствующем выборе состава и структуры керамические материалы могут иметь огромную механическую прочность, очень большую диэлектрическую проницаемость, очень малые диэлектрические потери, ничтожный или очень большой, наперед заданный коэфициент емкости, огромную термическую стойкость (до 2000°).

Совершенно ясно, что один вид керамики, например, изоляторный фарфор, не может служить универсальным материалом даже в одном каком-либо устройстве. Радиокерамика развилась в настоящее время в самостоятельную специфическую область изоляционной техники. За последние 10 лет в СССР получили промышленное значение около 15 специальных керамических материалов, отличающихся самыми различными электрическими и физико-механическими свойствами.

Применение их для отдельных назначений может оказаться эффективным не только в высокочастотной технике, но и в других областях электропромышленности.

Глава XII

КЕРАМИЧЕСКИЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

§ 47. Классификация керамических материалов согласно назначению

Радиокерамика в зависимости от назначения и электрических свойств разделяется на следующие группы:

1. Установочная керамика: а) невысокого качества — изоляторный фарфор, б) повышенного качества — радиофарфор, пирофиллит.

2. Керамика высокого качества для установочных изделий и высокочастотных конденсаторов — ультрафарфор, алюминоксид.

3. Конденсаторная керамика, отличающаяся повышенным или высоким значением диэлектрической проницаемости ($\varepsilon > 10$) и применяемая для изготовления: а) низковольтных и высоковольтных конденсаторов (тиконд разных марок); б) низковольтных конденсаторов с малым $TK\varepsilon$ (термоконд, тиглин).

4. Пористая керамика: а) для оснований проволочных сопротивлений — шамотная, алундовая, талько-шамотная керамика, б) с очень высокими электрическими свойствами — для изоляторов электронных ламп — пористый алюминоксид, пористый радиостеатит.

Приводим перечень изделий, которые выполняются из радиофарфора, ультрафарфора, тиконда и других материалов.

Таблица 9

Изделия из керамических материалов

Радиофарфор	Опорные, проходные, подвесные, мачтовые высокочастотные изоляторы, каркасы катушек индуктивности. Плоские и фигурные установочные изоляторы. Анодно-разделительные конденсаторы
Ультрафарфор Радиостеатит Алюминоксид	То же, что из радиофарфора, но для ответственных назначений. Контурные конденсаторы. Термически стойкие изделия (авто- и авиасвечи).
Тиконд разных марок Тиглин Термоконд	Контурные высоковольтные и низковольтные конденсаторы, подстроечные, компенсирующие и высокостабильные.
Пористый алюминоксид	Изоляторы внутри электронных ламп.

На рисунках 86—93 представлены выпускаемые разнообразные детали из радиокерамики—планки, каркасы, кольца, гребенки, антенные изоляторы, конденсаторы, шайбы для высокочастотных кабелей и другие изделия.

§ 48. Классификация радиокерамических материалов по роду исходного сырья и составу кристаллической фазы

Радиокерамика изготовляется на основе самых различных сырых материалов, простых металлических окислов (химикатов) и сложных неорганических соединений естественного (минерального) происхождения.

Вид сырья определяет не только электрические и физические свойства готового продукта, но и технологические приемы оформления изделий.

Следует в первую очередь различать глинистую, пластичную керамику и безглинистую, пластичность которой до обжига обеспечивается искусственными приемами и всегда ниже, чем пластичность глинистой керамики. Понятно, что изделия из глинистой керамики, благоприятной в технологическом отношении, как правило доступнее чем в случае безглинистого сырья. К материалам с высоким содержанием глины относятся изоляторный фарфор, пирофиллит, радиотехнический фарфор, ультрафарфор, тиконд марки Т-30 и Т-60. К безглинистой или малоглинистой керамике относятся алюминоксид, радиостеатит, тиконд марки Т-80, термоконд, титанаты бария.

Безглинистая керамика отличается резко выраженными электрическими свойствами: очень малыми диэлектрическими потерями, или очень высокой диэлектрической проницаемостью, или очень малым температурным коэфициентом диэлектрической проницаемости при высоком значении ее. Глина, которая содержит заметное количество щелочных окислов, в процессе обжига приводит к обогащению керамики щелочной аморфной фазой. Получение керамики с очень высокой диэлектрической проницаемостью при большом содержании в ней глины не представляется возможным.

Что касается влияния глины на диэлектрические потери, то оно проявляется по разному, в зависимости от содержания в керамике других сырых материалов. Так, например, глиноземистая керамика обнаруживает малые диэлектрические потери даже при высоком содержании глины (ультрафарфор). Наоборот, тальковая (стеатитовая) керамика обладает малыми диэлектрическими потерями только при самом незначительном содержании глины.

В качестве сырья для непластичной керамики широко используются простые металлические окислы, окись алюминия, двуокись титана, окись магния, а также минералы магнезит, мрамор, некоторые сорта талька и др.

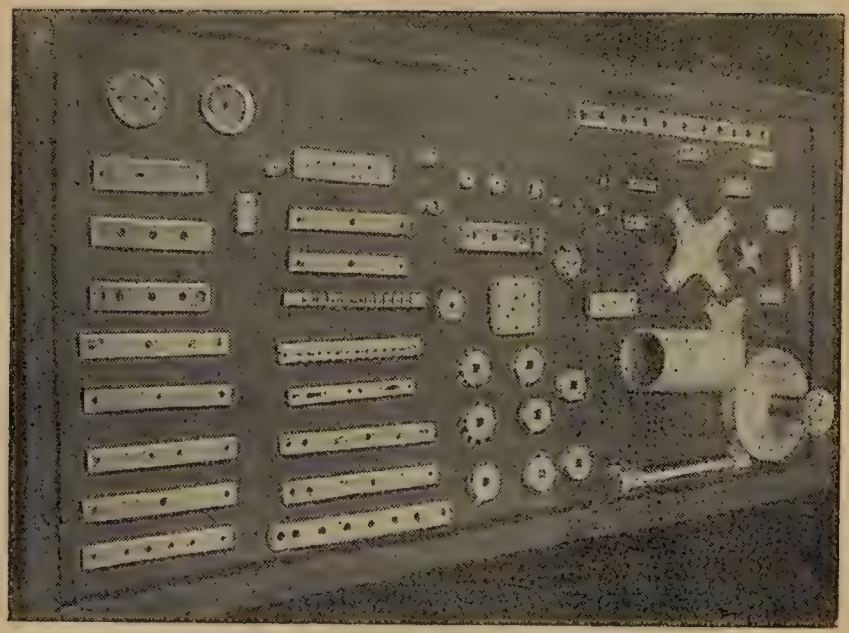


Рис. 86. Детали из радиокерамики.

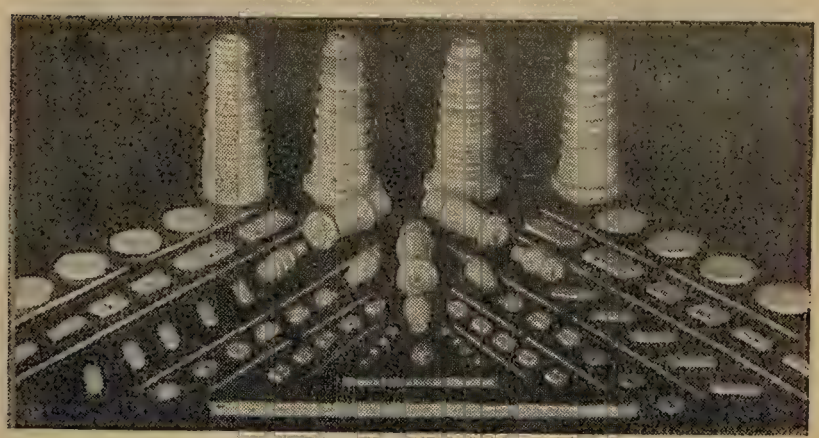


Рис. 87. Блок боченочных конденсаторов из тиконда емкостью 3000 *мкмкф*.

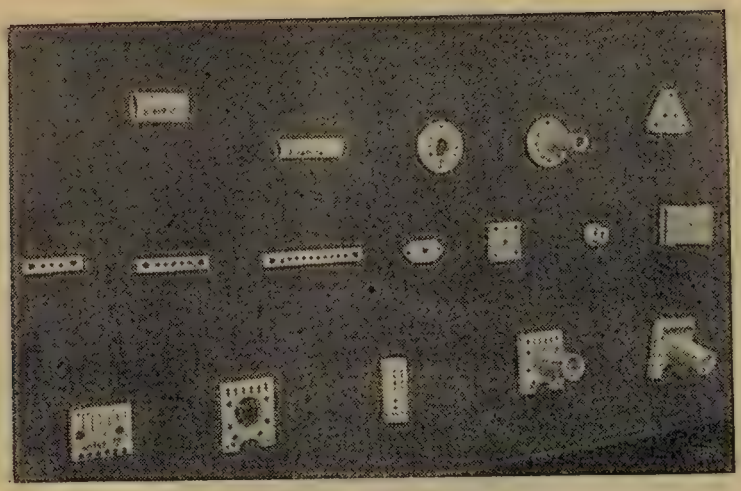


Рис. 88. Детали из радиокерамики.

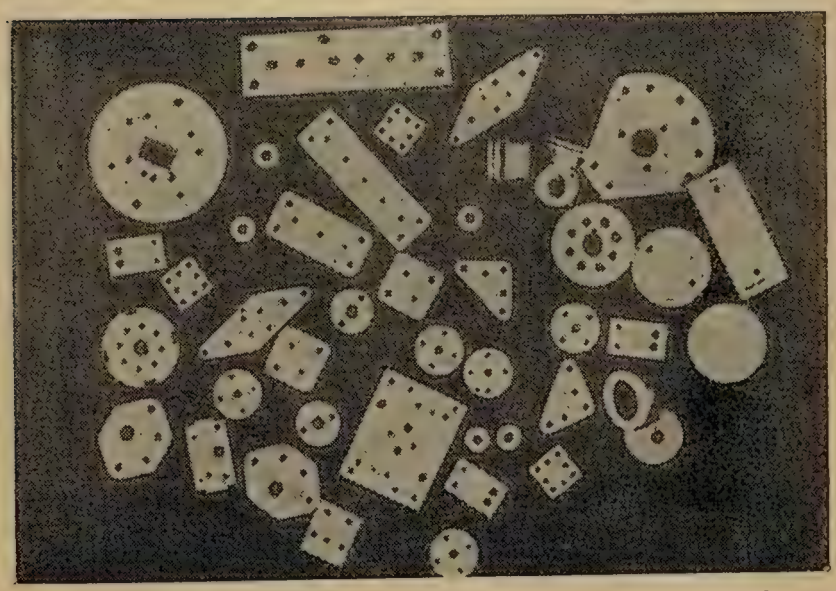


Рис. 89. Мелкие установочные детали из радиокерамики.

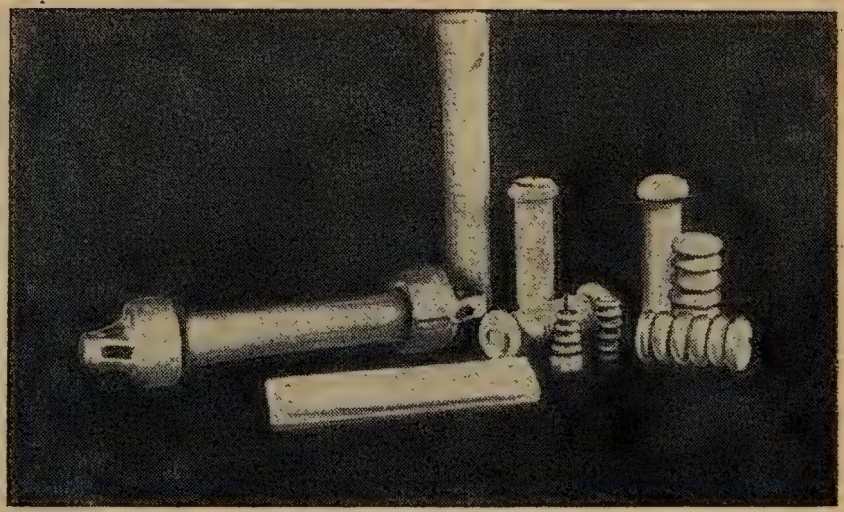


Рис. 90. Антенные и опорные изоляторы из радиофарфора.

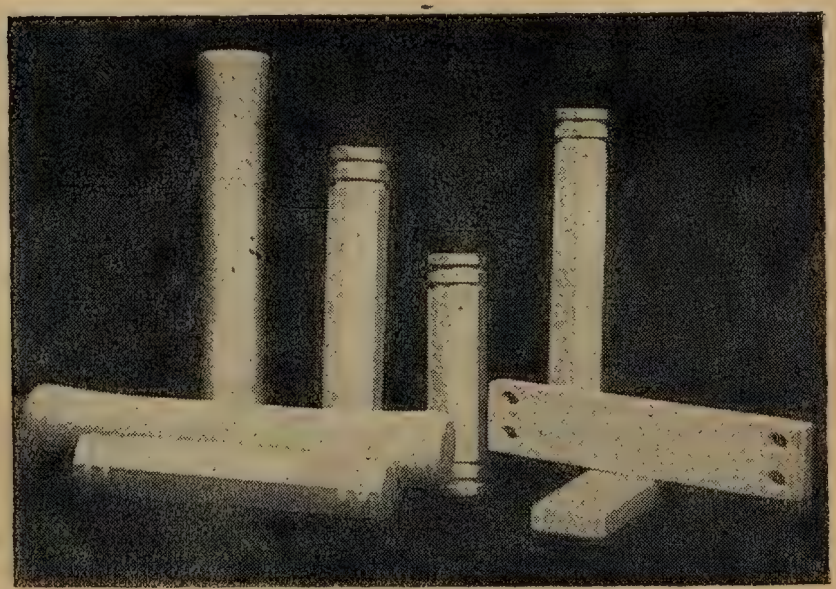


Рис. 91. Изоляторы из радиокерамики.

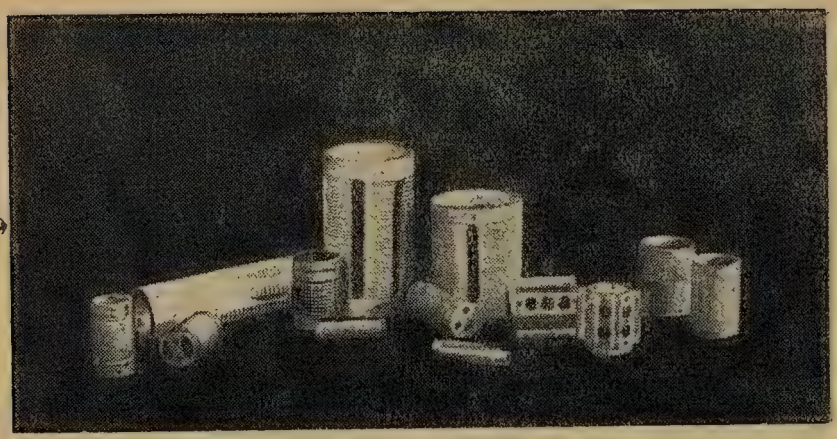


Рис. 92а. Каркасы катушек индуктивности из радиофарфора.

Рис. 92б. Высоковольтный разделительный конденсатор горшкового типа из радиофарфора.

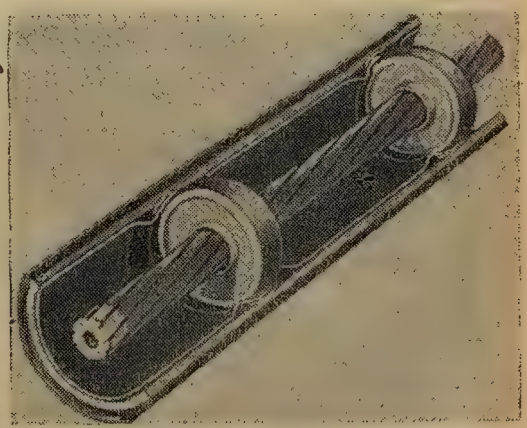


Рис. 93а. Шайбы высокочастотного кабеля из радиокерамики.

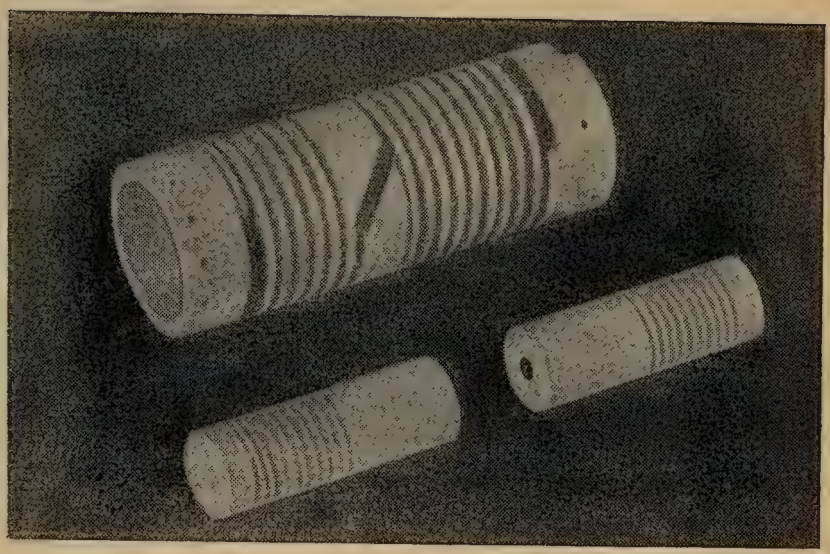


Рис. 93б. Катушки индуктивности из ультрафарфора с обмоткой, нанесенной вжиганием.

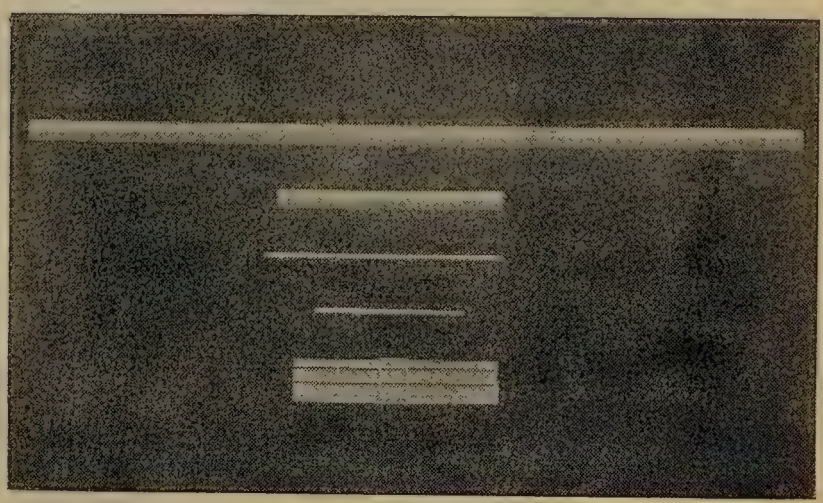


Рис. 93в. Шлифованные оси из ультрафарфора.

Технология изготовления изделий из непластичной керамики значительно сложнее, чем в случае, например, изоляторного фарфора. Пластификация безглинистой керамики производится или путем добавки органических пластификаторов, например, декстрина, выгорающих в процессе обжига, или неорганических материалов бентонита, в количестве нескольких процентов. В этом случае оказывается возможной не только сухая прессовка порошка, но и выдавливание массы через мундштук или формовка изделий на гончарном круге. Однако, получение больших изделий из безглинистой керамики (например, крупных опорных, проходных изоляторов) представляет значительные трудности. Вследствие слабой связанности частиц такой керамики, изделия легко растрескиваются при сушке или в процессе обжига. Температурный интервал спекания керамики должен быть достаточно широким, в особенности для изделий крупных габаритов. Изделия из керамики с узким интервалом спекания следует обжигать в печах, обеспечивающих большую точность заданной температуры. Превышение максимальной температуры на 10—15° приводит к сильным деформациям и оплавлению изделий, т. е. к окончательному браку. Наоборот, при недообжиге на 5—10° детали получаются пористыми, гигроскопичными. Особенно неблагоприятными в отношении спекаемости являются детали больших размеров. За границей, в частности в США, безглинистая (стеатитовая) керамика находит широкое применение. Однако, в виду того, что изделия после обжига часто получаются пористыми, фирмы вводят несколько классов такой керамики, которые отражают степень пористости изделий.

Приводим классификацию стеатита по данным испытаний электрических свойств после погружения образцов в воду, рекомендуемую американским стандартом.

Коэфициент потерь для групп стеатита
(после увлажнения)

Название группы	$\varepsilon \operatorname{tg}\delta$ при $f=1$ *мгц*
L-1	0,150
L-2	0,070
L-3	0,035
L-4	0,016
L-5	0,008
L-6	0,004

С точки зрения исходного сырья и, следовательно, технологических особенностей отечественная электрокерамика может быть классифицирована следующим образом:

1. Глинистая — изоляторный фарфор, пирофилит, радиофарфор.
2. Глиноземистая — ультрафарфор, алюминоксид, керамит.
3. Тальковая — радиостеатит.
4. Титаносодержащая — тиконд разных марок, тиглин, гибар.
5. Титано-цирконневая (термоконд).

Кристаллическая фаза, образующаяся при обжиге керамических масс, в зависимости от выбранного сырья, соотношения компонент и режима обжига, представляет собой определенные минералогические образования, в значительной мере предопределяющие свойства керамики. Ниже, в таблице 10 приводятся характеристики основных групп отечественной радиокерамики с точки зрения состава содержащейся в ней кристаллической фазы.

Электрические и физико-механические свойства керамики определяются соотношением кристаллической и аморфной фазы и видом присущих керамике минералообразований.

Керамика представляет собой либо преимущественно кристаллические системы (алюминоксид, стеатит, ультрафарфор, тиконд и др.), в которых стекловидная фаза имеется в более или менее ограниченных количествах, либо системы, состоящие из кристаллической и значительного количества аморфной фазы (радиофарфор, изоляторный фарфор, пирофилит).

Материалы первой группы отличаются, как правило, малыми диэлектрическими потерями, однако, при неправильной технологии вполне возможны неудовлетворительные электрические характеристики. Большие диэлектрические потери могут обусловливаться пористостью, т. е. находящейся в порах влагой, и тогда они легко устраняются переобжигом данной партии изделий. Если кристалловидная керамика имеет большие потери и не отличается пористостью, то потери должны быть связаны с примесными окислами. Степень вредности таких загрязнений зависит от режима обжига, гранулометрии массы, максимальной температуры обжига и среды при обжиге (восстановительной, нейтральной, окислительной). Небольшие отступления от установленного режима обжига кристалловидной керамики могут приводить к значительным изменениям $\operatorname{tg}\delta$.

В связи с этим кристалловидная керамика с очень малым значением $\operatorname{tg}\delta$ практически не имеет всегда строго воспроизводимых показателей электрических свойств. Наблюдаются некоторые колебания в значениях угла диэлектрических потерь в отдельных образцах одной и той же керамики, главным образом вследствие загрязнений сырьевых материалов.

Таблица 10

Характеристика электрокерамики по составу кристаллической фазы

№ № групп	Вид керамики	Главный вид сырья	Характерная кристаллическая фаза: название	Характерная кристаллическая фаза: химич. формула	Главные особенности керамики
I	Изоляторный фарфор	Глина Кварц Полевой шпат	Муллит Кварц	$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ SiO_2	Простая технология
II	Радиофарфор	Глина Углекислый барий Кварц	Муллит Цельзиан (?)	$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ $BaOAl_2O_3 \cdot 2SiO_2$	Малые диэлектрические потери Простая технология
III	Ультрафарфор	Глинозем Глина	Корунд Муллит	Al_2O_3 $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	Высокая механическая прочность. Очень малые диэлектрические потери
IV	Стеатитовая керамика	Тальк Глина Магнезит	Клиноэнстатит Форстерит Кордиерит	$MgO \cdot SiO_2$ $2MgO \cdot SiO_2$ $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$	Высокая механическая прочность, малые диэлектрические потери Малый температ. коэф. расширения
V	Тиконд разных марок	Двуокись титана	Рутил	TiO_2	Высокая диэлектрическая проницаемость, отрицательный $TK\varepsilon$
	Титанат кальция	Кальцит Двуокись титана	Перовскит	$CaTiO_3$	
VI	Термоконд	Двуокись титана Двуокись циркония	Рутил	TiO_2 ZrO_2	Малый отрицательный или положительный $TK\varepsilon$
	Тетратитанат бария	Углекислый барий Двуокись титана		$BaO \cdot 4TiO_2$	
	Пентатитанат бария			$BaO \cdot 5TiO_2$	
VII	Титанат магния	Двуокись титана Магнезит	Типа ильменит	$MgTiO_3$	Малый положительный $TK\varepsilon$
VIII	Титанат бария (Модификация сегнет-электрика)	Углекислый барий Двуокись титана	Типа перовскит	$BaTiO_3$	Сверхвысокое значение диэлектрической проницаемости. Свойства сегнетоэлектрика

Диэлектрические потери в керамике с большим содержанием аморфной фазы обусловливаются в основном этой фазой и зависят от ее химического состава. В данном случае применимы все те соображения, которые высказывались по поводу диэлектрических потерь в стеклах. Диэлектрические потери здесь мало чувствительны к изменениям режима и среды обжига; при обжиге такой керамики требуется только полное спекание черепка.

§ 49. Радиокерамика с невысоким значением диэлектрической проницаемости

Изоляторный фарфор—первый керамический диэлектрик, получивший широкое применение в электротехнике, а затем в радиотехнике. Основными компонентами изоляторного фарфора являются каолиниты (каолин, глина), кварц и полевой шпат. Указанные материалы должны быть в предельной степени свободными от окислов железа. Глина должна быть огнеупорной. Лучшие, имеющие союзную известность, месторождения глины—часовъярское, латнинское, соболевское. Фарфоровый черепок представляет собой стекловидную массу, пронизанную кристаллами муллита $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, с вкраплениями кристаллического кварца. Изоляторный фарфор как высокочастотный диэлектрик обладает невысокими электрическими свойствами и во многих случаях не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к материалу для установочных деталей. Особенно неблагоприятными свойствами изоляторного фарфора являются невысокая механическая прочность, большие диэлектрические потери и резкое возрастание угла диэлектрических потерь с повышением температуры, начиная с низких температур. В связи с возможностью по этой причине термического разрушения изолятора (теплового пробоя), применение изоляторного фарфора в колебательных контурах мощных радиоустройств недопустимо.

Как уже говорилось ранее, диэлектрические потери в фарфоре определяются количеством и составом стекловидной фазы. Фарфоры технического значения отличаются разным содержанием полевого шпата. В таблице 10а приведена рецептура некоторых основных марок фарфора.

Электрические свойства всех компонент фарфора изучались в отдельности. На рис. 94 приведена зависимость угла потерь от температуры при высокой частоте для образцов глуховецкого каолина и часовъярской глины. Температурная зависимость $tg\delta$ каолина несколько более благоприятна, чем в случае глины, что, конечно, в первую очередь должно быть связано с меньшим содержанием щелочных окислов в каолине.

Таблица 10а

Процентный состав основных марок фарфора

Наименование фарфора	Вид сырья				
	Каолин	Глина часовъярская	Полевой шпат	Череп (бой фарфора)	Кварц
Фарфор твердый					
а) изоляторный	29	15	16	20	20
б) химический	57	28	9	5	—
в) трубочный	45	32	3	20	-
Фарфор высоковольтный	30	15	30	5	20
Фарфор электротехнический	32	18	18	10	22

Электрические свойства различных образцов глины неодинаковы и определяются, повидимому, содержанием щелочей в пластах, из которых она добывалась.

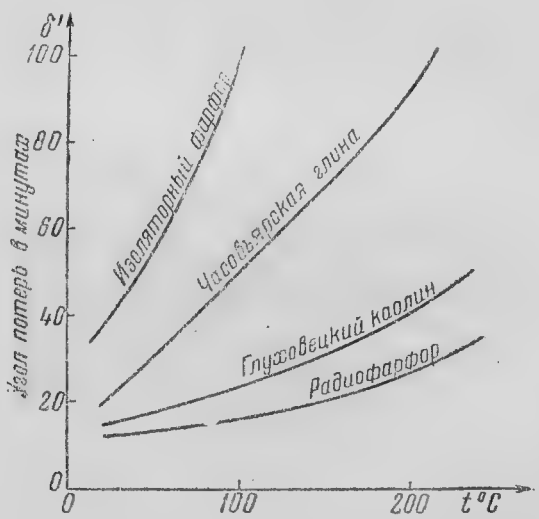


Рис. 94. Зависимость угла диэлектрических потерь от температуры для каолинитового сырья, изоляторного фарфора и радиофарфора, *f = 1 мгц*.

Содержание щелочных окислов в каолине обычно не превосходит 0,5%, в часовъярской глине доходит до 3%, в полевых шпатах щелочные окислы содержатся в количестве 8—13%

Полевой шпат является основной компонентой, влияющей на потери в фарфоре. В виде породы полевой шпат имеет кристаллическую структуру и отвечает минералогической формуле: $K_2OAl_2O_3 \cdot 6SiO_2$. При обжиге с другими компонентами фарфора полевой шпат играет роль плавня и образует аморфную фазу фарфора. Угол диэлектрических потерь фарфора тем меньше, чем меньше в нем содержится полевого шпата. Тангенс угла потерь изоляторного фарфора при частоте $f = 1 \cdot 10^6$ *гц* и $t = 20°C$, равен 0,0100—0,0120; $tg\delta$ химического фарфора, как видно из рис. 95, несколько меньше,

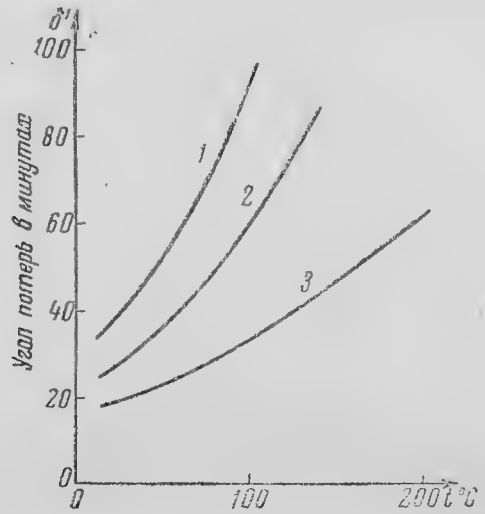


Рис. 95. Зависимость угла диэлектрических потерь от температуры.
1—изоляторный фарфор, 2—химический, 3—трубочный фарфор.

в случае трубочного фарфора $tg\delta = 0{,}0050$, т. е. меньше, чем у пирофиллита при нормальной температуре, так же, как и при высоких температурах. Это обстоятельство представляет большой интерес, так как оно намечает путь получения глинистой керамики с малыми потерями. Недостатком трубочного фарфора следует считать довольно высокую температуру спекания (около 1400°).

Какие пути можно было предложить для улучшения свойств фарфора? Первый путь—изыскание нового состава с компонентами без щелочей. Этот путь несомненно должен повести к усложнению технологии. Второй путь, который был намечен нами в работе по стеклам, заключается в повышении электрических свойств щелочного стекла путем введения в него окислов тяжелых металлов. Опыт

подтвердил это положение. Введение в фарфоровые массы тяжелых окислов резко снижает начальные значения угла потерь и значительно улучшает температурную характеристику tgδ, что видно из рис. 96.

Таким путем была получена радиокерамика на основе обычного глинистого сырья безотносительно к месторождению этого сырья (украинскому, сибирскому, уральскому, белорусскому и т. п.),— радиотехнический фарфор.

В первое время наряду с изоляторным фарфором в радиопромышленности нашла применение керамика на основе минерала пирофиллита, получившая отсюда свое название. Месторождения пирофиллита имеются в Белоруссии (мозыровручское), на Урале (чистогоровское), а также в Армянской ССР (дсехское). По химическому составу минерал пирофиллит отвечает формуле $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$. Пластичностью пирофиллит не отличается, вследствие чего в состав пирофиллитовой керамики вводится глина, обеспечивающая пластичность массы.

Пирофиллитовая керамика характеризуется температурной зависимостью угла диэлектрических потерь лучшей, чем у изоляторного фарфора. Однако абсолютные значения угла потерь, а также механическая прочность пирофиллита очень далеки от современных требований. Кроме того, особенностью пирофиллита является большой коэфициент линейного расширения, что влечет за собой пониженную термическую стойкость изделий. Тем не менее первоначально в связи с отсутствием в Союзе другой, лучшей по качеству керамики, пирофиллит получил большое применение на радиотехнических заводах.

Дальнейшим развитием отечественной радиокерамики явился, как указывалось, радиотехнический фарфор, разработанный в 1938 году. Этот материал нашел широкое применение в радиопромышленности, особенно в годы Отечественной войны, когда важно было возможно больше использовать местное сырье.

Радиокерамику с невысокой диэлектрической проницаемостью по технологическим и электрическим особенностям можно разделить на две группы.

Первая группа, представляемая радиофарфором, отличается очень простой и удобной технологией, низкой температурой обжига, малыми усадочными коэфициентами. Радиофарфор эффективно используется для тех назначений, где не требуются очень малые диэлектрические потери или очень высокая механическая прочность. В последнем случае следует делать выбор среди другой группы радиокерамики, пригодной для установочных целей, исключительно качественной, представляемой ультрафарфором, алюминоксидом, радиостеатитом.

Алюминоксид является почти чистой окисью алюминия, спекающейся при температуре 1750—1800°. По минералогическим признакам алюминоксид состоит из кристаллов корунда с прослойкой аморфной фазы, трудно определяемой микроскопическими методами. Насколько совершенны электрические и физические свойства такой керамики, настолько сложно и дорого ее получение.

Алюминоксид совершенно не обладает пластичностью. Вследствие этого, без введения специальных пластификаторов, из него могут быть получены изделия только небольших размеров—плоские детали размером в пределах $\sim 50 \times 50 \times 15$ *мм* путем сухой прессовки порошка в прессформах на гидравлическом прессе и тела вращения, диаметром не свыше 50—60 *мм*, длиной ~150—200 *мм*, путем литья жидкой массы шликера в гипсовые формы. Такие заготовки после утильного обжига или пропитки органическим составом, повышающих механическую прочность их, обрабатываются на токарных и других металлообрабатывающих станках. Чем больше размер изделия из алюминоксида, тем больше брак в производстве вследствие растрескивания, и только совсем небольшие алюминоксидные детали могут быть получены при нормальном для керамического производства проценте брака. Необходимо также учитывать абразивность прессовочного порошка, которая ведет к быстрому изнашиванию прессформы, и исключительно высокую температуру обжига алюминоксида, связанную с большим расходом горючего, а также расходом специального огнеупорного (корундового) кирпича для горнов. Теперь в Союзе эта керамика выпускается главным образом в пористом виде—как изоляция для электронных ламп.

Тем не менее алюминоксид представляет большой технический интерес. Для специальных целей, когда необходимо получить деталь небольшого размера с исключительно высокими свойствами, с теплопроводностью, близкой к металлу, теплостойкостью до 1500°, огромной механической прочностью, большим удельным сопротивлением при высоких температурах, и очень низкими диэлектрическими потерями, следует в отдельных случаях использовать алюминоксид.

Ультрафарфор — радиокерамика, пригодная для установочных изделий и для конденсаторостроения. Отличаясь очень высокой механической прочностью и малыми диэлектрическими потерями (временное сопротивление изгибу $K_{изг} = 1200—1600$ *кг/см*^{2}, $\operatorname{tg}\delta$ при высоких частотах 0,0006 – 0,0009), ультрафарфор по своей технологии близок к изоляторному или радиотехническому фарфорам и допускает все принятые в керамике виды оформления изделий. Температура обжига ультрафарфора соответствует температуре так называемого твердого фарфора, применяемого

для изготовления химической посуды, и лежит в пределах 1350—1380°. Подобно изоляторному или радиотехническому фарфору, ультрафарфор с точки зрения состава не связан с каким-либо определенным видом минерального сырья; глина, глинозем и тяжелый баритовый окисел являются его основными компонентами.

Свойства применяемой в Союзе радиокерамики приведены в таблице 11. На рис. 96 представлены температурные зависимости угла потерь некоторых высокочастотных керамических диэлектриков. На рис. 97 приведены зависимости удельного объемного сопротивления этих материалов

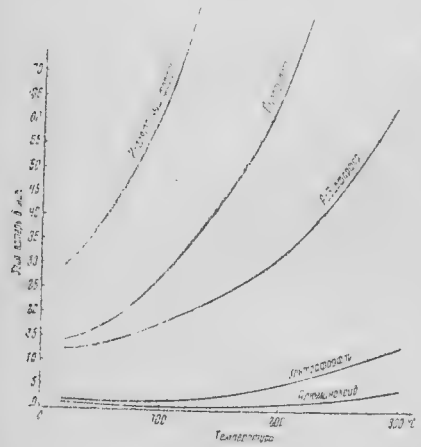


Рис. 96. Зависимость угла диэлектрических потерь установочной радиокерамики от температуры при $f = 1 \cdot 10^6$ *гц*.

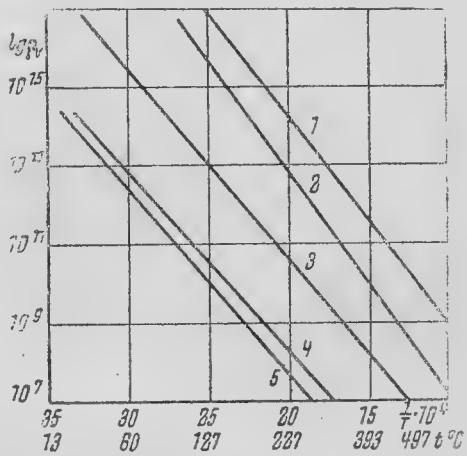


Рис. 97. Температурная зависимость удельного объемного сопротивления. 1—алюминоксид; 2—ультрафарфор, 3—радиофарфор; 4 — часовъярская глина; 5—изоляторный фарфор.

от температуры. На рис. 98 приведена температурная зависимость tgδ ультрафарфора при разных частотах.

Высокая термическая стойкость ультрафарфора позволяет изготовление из него изделий, подвергающихся резким изменениям температуры, в частности крупных проходных изоляторов герметизированных бумажных конденсаторов.

Блок дисковых конденсаторов из ультрафарфора емкостью 1000 *мкмкф* с реактивной мощностью 100 *ква* показан на рис. 99.

За границей радиокерамика базируется, главным образом, на некоторых сортах очень чистого талька ($3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$), скрыто-кристаллической структуры, жировика. Применение жировика обеспечивает пластичность

Таблица 11

Свойства радиокерамики с невысокой диэлектрической проницаемостью

Свойства керамики		Наименование керамики						
		Установочная керамика			Керамика для конденсаторов и установочных изделий			
		Радиофарфор	Пирофиллит	Изоляторный фарфор	Алюминоксид	Ультрафарфор	Керамит	Радиостеатит
Основная характеристика		Простая технология. Обычное в керамике сырье	Простая технология. Специальное минеральное сырье.	Простая технология	Очень малый угол потерь, очень высокая механическая прочность. Очень сложн. технология	Малые потери, высокая механическая прочность. Несложн. технология	Высокая механическая прочность. Малые потери	Малые диэл. потери, высокая мех. прочность, спец. минеральн. сырье
Область применения		Крупные и мелкие установочн. радиодетали, блокиров. и разделит. высоков. конденсаторы	Мелкие и средние установочные радиодетали	Изоляторы, применяемые вне поля высокой частоты	Специальные установочн. детали	Крупные и мелкие установ. детали. Контурн. конденсаторы	Мелкие и средние установочные детали	Мелкие и средние установочн. детали. Контурные конденсаторы
Угол диэлектрических потерь при радиочастот. в мин.	t = 20°C	10—12	20—25	30—35	0,5—1,5	2—3	3—4	1,5—2
	t = 100°C	15—20	35—40	90—110	1—2	3—5	4—7	2—3
Диэлектрическая проницаемость		6,0—6,5	5,5—6,0	5,5—6,0	10—11	7,0—7,5	7,5—8,0	6,0÷6,5
Температурный коэфициент диэлектр. проницаемости		$+180 \cdot 10^{-6}$	$+400 \cdot 10^{-6}$	$+550 \cdot 10^{-6}$	$+120 \cdot 10^{-6}$	$+120 \cdot 10^{-6}$	$+150 \cdot 10^{-6}$	$+110 \cdot 10^{-6}$
Удельное объемное сопротивление в *ом · см*	t = 100°C	$5 \cdot 10^{13}$	10^{12}	10^{11}	10^{16}	$5 \cdot 10^{13}$	10^{13}	10^{14}
	t = 300°C	$5 \cdot 10^{9}$	10^{8}	$5 \cdot 10^{6}$	10^{12}	$5 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^{10}$	10^{12}
Средняя пробивная напряженность в *кв/см* $U_{эфф}$ при 50 *гц*		150—200	150	100—200	150—200	150—200	150—200	200—250
Плотность в *г/см*^{3}		2,6	2,5	2,4	3,8	3,0	3,2	2,8
Временное сопротивление в *кг/см*^{2}	изгибу	500—700	500—700	450—650	2000—3000	1200—1600	1200—1600	1200—1600
	растяж.	250—350	250—350	200—300	1000—1500	400—550	450—600	450—600
	сжатию	4000—5000	4000—5000	4000—5000	10000—20000	6000—8000	6000—8000	6000—8000
Удельная ударная вязкость, в $\frac{кг \cdot см}{см^2}$		1,7—2	1,7—2	1,7—2	5—10	3—4	3—5	3—4
Коэфициент линейного расширения		$3,8 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$7,7 \cdot 10^{-6}$
Теплопроводность, в $\frac{вт}{см° C}$		0,015	0,015	0,015	0,15	0,05	0,06	0,02
Гигроскопичность (водопоглощение), в %		отсутствует						

массы при самом незначительном содержании глины. Принципиальная особенность радиофарфора или ультрафарфора наличие в качестве компоненты, корректирующей электри-

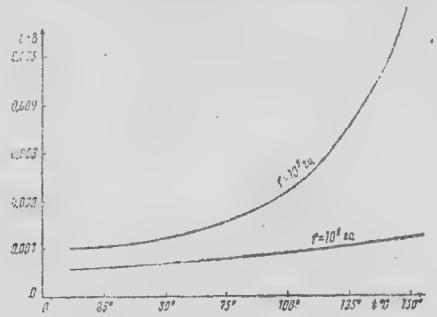


Рис. 98. Зависимость tgδ от температуры при разных частотах для ультрафарфора.

ческие свойства, тяжелого баритового окисла—использовано и в тальковой радиокерамике.

Первым видом тальковой радиокерамики был так называемый нормальный стеатит, разработанный в период 1925—

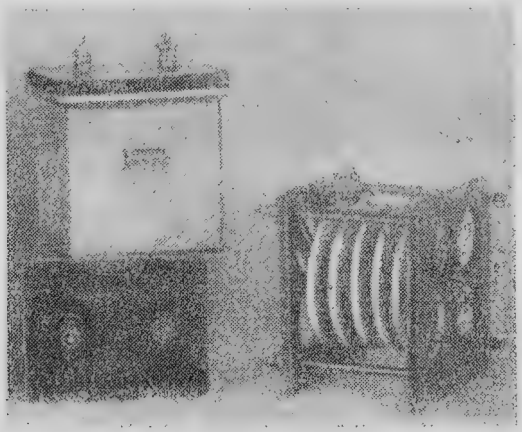


Рис. 99. Блок дисковых конденсаторов из ультрафарфора, равноценный двум слюдяным конденсаторам. $C = 1000$ *мкмкф; $P_р = 100$ ква; $U_{эфф} = 8$ кв.*

1930 гг., в состав массы которого входил тальк (жировик)—87%, глина—7% и полевой шпат—6%. Температура спекания нормального стеатита составляет 1380—1400°. С 1933 года керамические предприятия Германии начали выпус-

кать массы типа стеатита с более высокими свойствами. Фирма Стемаг, разработала и выпустила качественную керамику под названием фреквента. Почти одновременно появился новый однотипный материал, калит, выпущенный фирмой Хешо (Хермсдорф—Шомбург, Тюрингия), по свойствам равноценный фреквенте. Температура спекания фреквенты и калита около 1350°. Выпускавшаяся некоторое время фирмой Хешо талько-магнезиальная керамика—калан не получила широкого применения. На рис. 100 и 101 приведены зависимости tgδ от температуры и частоты для немецкой высокочастотной керамики сравнительно с данными для слюды и кварцевого стекла.

В США установочная радиокерамика выпускается под названием айсолентайт, ультрастеатит, альсимаг 193 и др. Американская фирма Вестингауз изготовляет также так называемый цирконовый фарфор с очень высокой механической прочностью и высокими электрическими свойствами. Временное сопротивление на изгиб этого материла доходит до 1750 $\frac{кг}{см^2}$; $tg\delta = 0{,}0006$ ($f = 1$ *мгц*).

В Союзе тальковая керамика изготовляется на основе талька онотского месторождения, характеризующегося очень малым содержанием окиси железа. Содержание окиси железа в онотском тальке составляет 0,5 — 1,0%, в то время как уральский тальк содержит $FeO + Fe_2O_3$ в количестве 4 — 5%. Свойства отечественного радиостеатита приведены в таблице 11.

§ 50. Конденсаторная радиокерамика

Отдельную большую группу радиокерамики составляют материалы с повышенной, высокой и сверхвысокой диэлектрической проницаемостью, так называемая конденсаторная радиокерамика. Основной компонентой этих масс является двуокись титана TiO_2, образующая в процессе обжига кристаллы рутила или различные титанаты.

Первую подгруппу конденсаторной керамики образуют материалы с большими отрицательными значениями температурного коэфициента диэлектрической проницаемости. Сюда относятся тиконд различных марок и исследуемые в настоящее время титанаты двухвалентных металлов—титанат кальция, титанат стронция и др. Имеется четыре марки тиконда Т-25, Т-30, Т-60 и Т-80. Номера тиконда соответствуют значению его диэлектрической проницаемости. Температурный коэфициент диэлектрической проницаемости каждой из этих марок отрицательный и соответственно

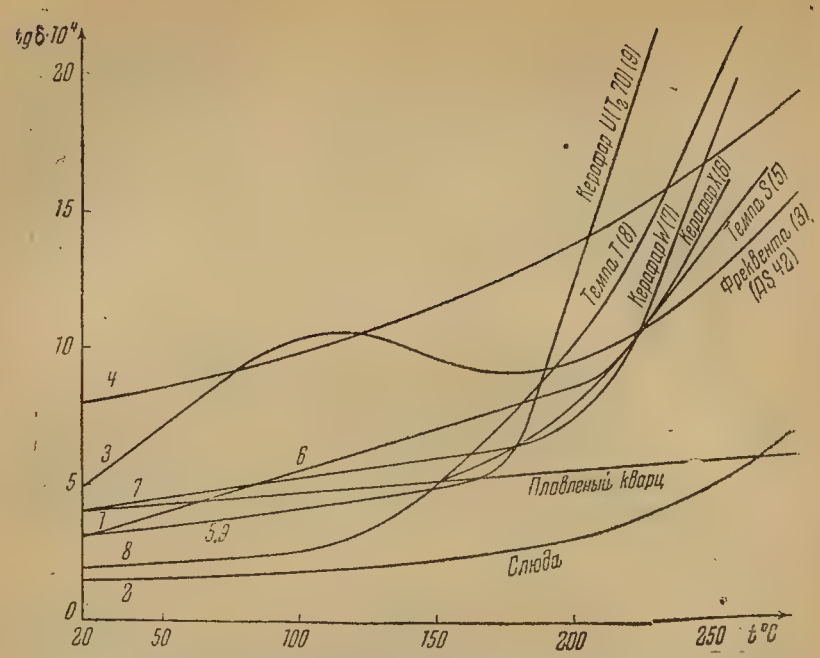


Рис. 100. Зависимость tgδ немецкой радиокерамики от температуры при радиочастотах (по литературным данным).

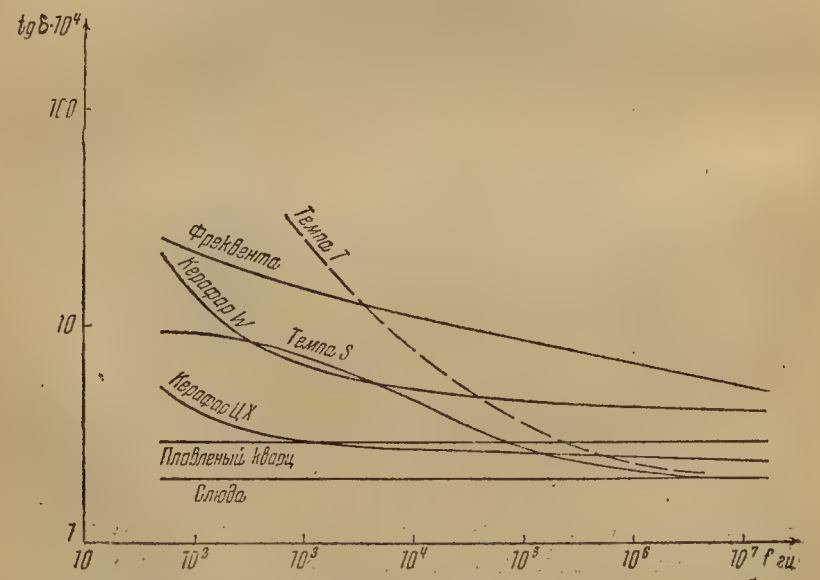


Рис. 101. Зависимость tgδ немецкой радиокерамики от частоты в логарифмическом масштабе (по литературным данным).

равен — (130 ± 50) · 10^{-6}; — (300 ± 50) · 10^{-6}; — (570 ± 70) · · 10^{-6}; —(730 ± 70) · 10^{-6}.

Температурная зависимость tgδ титановой керамики с высоким содержанием глины при разных частотах показана на рис. 102.

Тиконд Т-60 содержит заметное количество глины и поэтому настолько пластичен, что допускает формовку трубчатых, горшковых конденсаторов, а также протяжку изделий через мундштук. Непластичная марка тиконда Т-80 оформляется в изделия путем сухой прессовки порош-

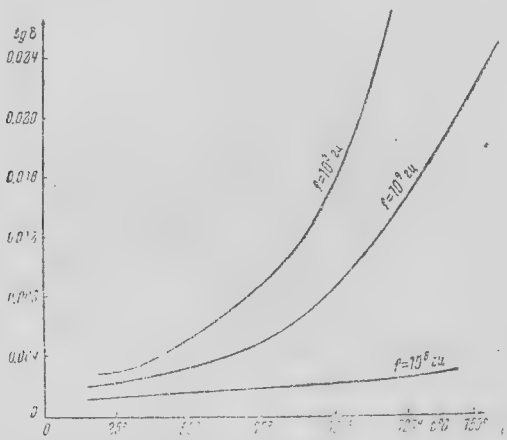


Рис. 102. Зависимость tgδ от температуры при разных частотах для титано-глинистой керамики.

ка, или протяжкой через мундштук с введением органических пластификаторов. Чем меньше глины содержится в тиконде, тем лучше его электрические свойства, тем меньше диэлектрические потери.

Титанат кальция—безглинистая керамика, отличается ТКε до —1500 · 10^{-6} и диэлектрической проницаемостью до 160. Очень высокое значение температурного коэфициента диэлектрической проницаемости ограничивает применение этого диэлектрика.

Вторую подгруппу конденсаторной керамики составляют материалы с очень малым температурным коэфициентом диэлектрической проницаемости (ТКε менее 80 · 10^{-6}) при сравнительно высоком ее абсолютном значении.

Керамический конденсаторный диэлектрик с очень малым ТКε может представлять собой или индивидуальное химическое соединение или смесь двух или больше кристаллических образований.

Среди индивидуальных химических соединений с малым ТКε можно указать тетратитанат бария $BaO \cdot 4TiO_2$, титанат магния $MgTiO_3$ и некоторые другие. Эти материалы имеют ТКε менее $100 \cdot 10^{-6}$. Применение указанных материалов в качестве диэлектрика стабильных конденсаторов при серийном производстве связано с необходимостью точного соблюдения заданной рецептуры.

Другим видом конденсаторной керамики с малым ТКε, как было указано, является смесь двух или больше определенных кристаллических и аморфных образований. Первым направлением создания такого материала явилось сочетание кристаллов корунда с кристаллами рутила с добавкой глинистых и флюсующих веществ. Технический диэлектрик подобной рецептуры был освоен в серийном производстве и получил название тиглина. Однако невысокие значения диэлектрической проницаемости тиглина заставили вести дальнейшие изыскания. В результате в последнее время был получен диэлектрик, у которого в качестве кристаллической фазы с положительным ТКε была выбрана двуокись циркония; этот материал получил название термоконд. Диэлектрическая проницаемость термоконда $\varepsilon \simeq 25$, $ТК\varepsilon = -(50 \pm 30)\,10^{-6}$.

Отношение разности максимального и минимального значения ТКε отдельных образцов керамики одного и того же вида к среднему значению тем больше, чем меньше абсолютная величина ТКε. При малых значениях ТКε абсолютная величина погрешности измерения ТКε снижается, но одновременно значительно затрудняется получение воспроизводимых результатов по технологическим соображениям.

На рисунках 103, 104а, 104б и 104в показаны различные конструкции малогабаритных конденсаторов постоянной емкости и подстроечные конденсаторы (триммерные).

Особое место среди конденсаторной керамики занимают материалы на основе титаната бария TiO_2 BaO, отличающиеся сверхвысокой диэлектрической проницаемостью. Титано-бариевая керамика принадлежит, согласно исследованиям Б. М. Вула, к классу сегнетэлектриков и обладает диэлектрической проницаемостью в зависимости от температуры от 300 (при температурах, близких к абсолютному нулю) до 6000—7000 при температуре около 100° С, отвечающей максимальному ее значению. Эта температура является для титано-бариевой керамики точкой Кюри, выше которой сегнетоэлектрические свойства пропадают.

Диэлектрические потери титано-бариевой керамики большие ($\delta = 50' - 70'$ при высоких частотах), благодаря чему она используется лишь наряду с бумажными конденсаторами.

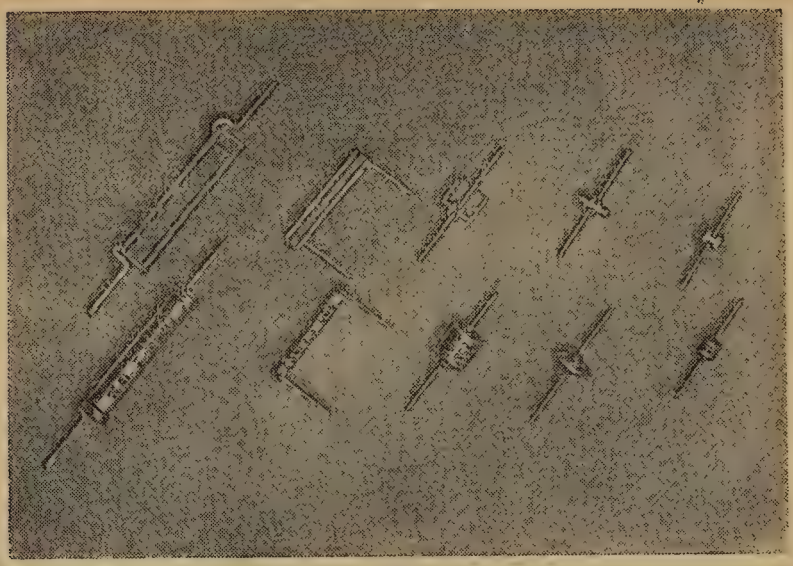


Рис. 103. Малогабаритные керамические конденсаторы открытой конструкции.

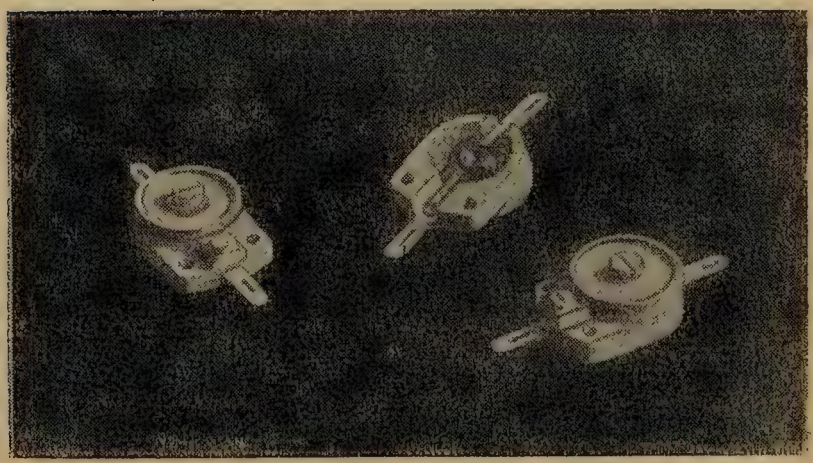


Рис. 104а. Подстроечные керамические конденсаторы типа КПК-1.

Таблица 12

Свойства конденсаторной керамики

Свойства керамики	Наименование керамики							
	Тиконд Т-80	Тиконд Т-60	Тиконд Т-30	Тиконд Т-25	Термоконд ТК-М	Тиглин	Термоконд ТК-П	Титано-бариевая керамика
Основная характеристика	Высокая диэлектрическая проницаемость. Большое отрицательное значение $TK\varepsilon$		Среднее значение диэлектрич. проницаемости. Среднее отрицательное значение $TK\varepsilon$.		Низкий температурный коэфициент диэлектрической проницаемости			Исключительно высокая диэлектрическая проницаем.
Область применения	Малогабаритные конденсаторы, компенсирующие, контурные, блокировочные, подстроечные				Конденсаторы для стабильных колебательных контуров малой мощности			Конденсаторы взамен бумажных небольшой емкости и специальные
	Высоковольтные контурные и разделительные конденсаторы		—					
Угол диэлектрическ. потерь при радиочастотах в мин. $t = 20°C$	1—2	1—2	2—3	1—2	1—2	2—4	1—2	50—70
Угол диэлектрическ. потерь при радиочастотах в мин. $t = 100°C$	2—4	2—4	3—4	2—3	2—3	4—6	2—3	—
Диэлектрическая проницаемость	75—80	55—60	25—30	25—30	20—25	12—14	15—20	1000—6000 (большая зависимость от температуры и напряжения)
Температурный коэфициент диэлектрической проницаемости	$-(730 \pm 70) \cdot 10^{-6}$	$-(570 \pm 70) \cdot 10^{-6}$	$-(300 \pm 70) \cdot 10^{-6}$	$-(130 \pm 50) \cdot 10^{-6}$	$-(50 \pm 30) \cdot 10^{-6}$	$-(40 \pm 20) \cdot 10^{-6}$	$+(30 \pm 30) \cdot 10^{-6}$	Переменный
Удельное объемн. сопрот., в *ом · см* $t = 100°C$	10^{12}—10^{13}	10^{12}—10^{13}	$5 \cdot 10^{12}$—$5 \cdot 10^{13}$	10^{12}—10^{13}	10^{13}—$5 \cdot 10^{13}$	10^{13}—$5 \cdot 10^{13}$	10^{13}—$5 \cdot 10^{13}$	10^{11}
Удельное объемн. сопрот., в *ом · см* $t = 300°C$	10^{9}—10^{10}	10^{9}—$5 \cdot 10^{9}$	$5 \cdot 10^{9}$—10^{10}	10^{10}—$5 \cdot 10^{10}$	10^{10}—$5 \cdot 10^{10}$	10^{10}—10^{11}	10^{10}—10^{11}	$5 \cdot 10^{7}$
Средняя пробивн. напряженность, в *кв/см* при постоян напряжении	100	100	100	100	100—150	100—150	100—150	20—40
Плотность, в $г/см^3$	3,9	3,8	3,3	3,9	4,0	3,0	2,9	5,0
Временное сопротивление, в $кг/см^2$	1000—1300	1000—1200	1000—1200	800—1000	1000—1200	1000—1200	900—1000	—
Коэфициент линейного расширения	$7,5 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$	$6,5 \cdot 10^{-6}$	$6,4 \cdot 10^{-6}$	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	—
Теплопроводность в $вт/°C \cdot см$	0,03	0,03	0,035	0,03	0,035	0,03	0,04	—
Водопоглощение, %	о т с у т с т в у е т							

В. П. Вологдин показал возможность использования титанатов бария в качестве диэлектрика конденсатора в схеме умножения частоты.

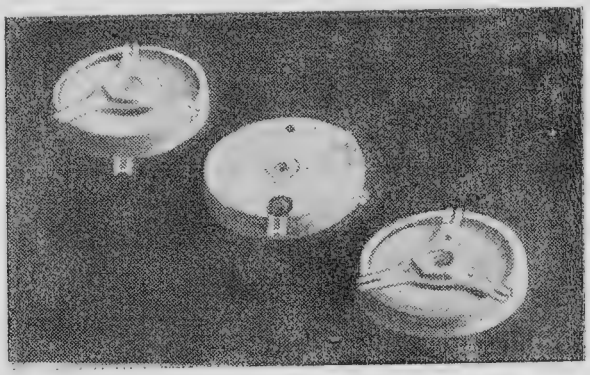


Рис. 104б. Подстроечные керамические конденсаторы типа КПК-2.

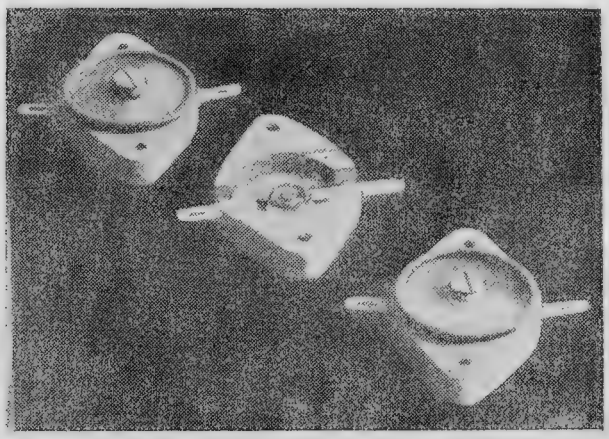


Рис. 104в. Подстроечные керамические конденсаторы типа КПК-3.

Электрические и физико-механические характеристики отдельных видов титано-содержащей конденсаторной радиокерамики приведены в таблице 12.

§ 51. Пористая электрокерамика

Группу пористых керамических диэлектриков, с одной стороны, составляют термостойкие материалы, к которым не предъявляется специальных электрических требований (шамот, алундовая, талько-шамотная, талько-дунитовая керамика), а с другой стороны, исключительно качественные по электрическим характеристикам материалы, применяемые для изоляции электродов внутри электронных ламп (пористый алюминоксид, пористая стеатитовая керамика).

Первая группа пористой электрокерамики в основном используется как основания проволочных сопротивлений (для радиосопротивлений, печей, термостатов). Качество керамики для сопротивлений определяется ее термостойкостью и механической прочностью. По электрическим свойствам эти материалы всегда укладываются в технические требования.

Все виды керамики для сопротивлений — глинистые. Изделия из них изготовляются путем пластичной прессовки (штамповки), когда никакой дополнительной механической обработки не требуется, или выдавливанием массы через мундштук с последующей обточкой или фрезеровкой подсушенных заготовок.

Шамот, наиболее доступная по роду сырья керамика, содержит жженую при $t \simeq 1300°$ огнеупорную глину или жженый каолин и сырую глину. Обычно используется тот же шамот, который идет для изготовления капселей, но степень измельченности зерен более высокая.

Талько-шамотная керамика также очень доступна. Чистота талька для этой керамики не имеет решающего значения.

Алундовая керамика содержит в своем составе корунд, повышающий термическую стойкость; по свойствам эта масса выше шамота и талько-шамота.

Талько-дунитовая керамика (название связано с минералом дунитом, входящим в ее состав) обладает повышенной механической прочностью по сравнению с простым шамотом и в основном применяется для изготовления оснований остеклованных постоянных сопротивлений из нихрома или константана.

Полученные в Германии близкие по свойствам материалы носят название сипа, сипалокс, ардостан, термизол.

Приводим процентный состав чистого кордиерита — керамики с очень малым коэфициентом теплового расширения:

Тальк	31,7
Каолин и глина	51,4
Корунд	16,9

В США пористая термостойкая керамика входит в общий ряд номеров альсимагов фирмы Лава, а также выпускается другими фирмами.

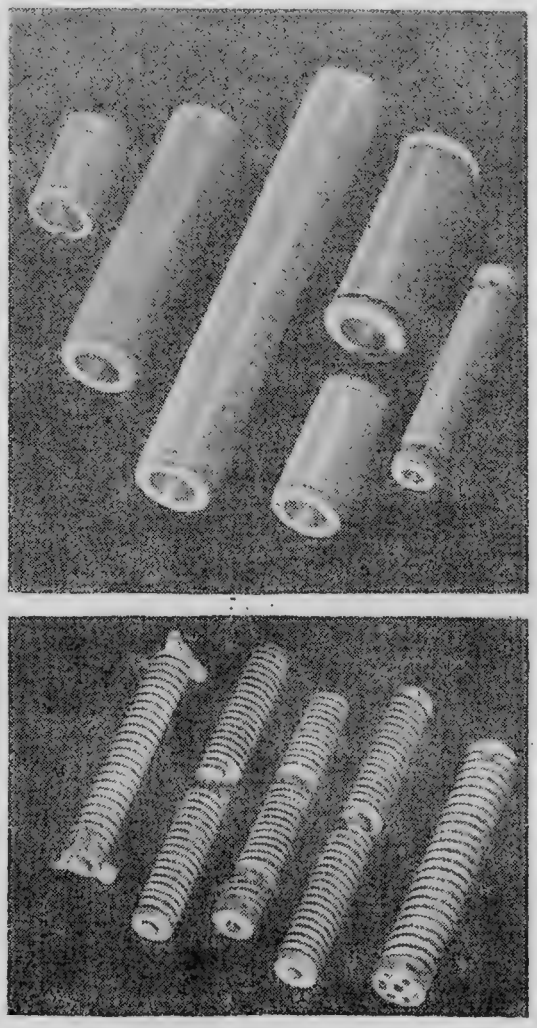


Рис. 105. Основания проволочных сопротивлений из пористой керамики.

Ниже приводятся свойства термостойких керамических материалов. На рис. 105 показаны различного типа основания проволочных сопротивлений.

Свойства термостойкой керамики

Свойства	Материал	
	Шамотная керамика	Кордиеритовая керамика
Плотность	1,9—2	2,1—2,2
Водопоглощение в %	10—15	0—2
Временное сопротивление на изгиб кг/см²	300—400	500—1000
Теплопроводность, в *вт/см · град*	0,01	0,02
Коэфициент расширения	$6 \cdot 10^{-6}$	$1{,}5—1{,}7 \cdot 10^{-6}$
Удельное объемное сопротивление в *ом · см* при 300°	10^8	10^9
при 600°	10^5	10^6

Вакуумная керамика должна отличаться малыми диэлектрическими потерями и малой электропроводностью при высоких температурах (при t-300—400°).

Пористость снижает значение диэлектрической проницаемости материала, что является благоприятным обстоятельством для вакуумных изоляторов. Процессы распыления металла внутри электронных ламп меньше сказываются на электрических свойствах пористой керамики, чем керамики плотной. Точность размеров изделий из пористой керамики может быть получена большая благодаря регулируемым усадочным коэфициентам при неполном спекании. Специальная пористая керамика для вакуумных ламп допускает даже механическую обработку, например, сверловку изделий, после обжига. Герметичность баллонов исключает возможность ухудшения электрических свойств вакуумной керамики вследствие поглощения влаги.

На рисунках 106—109 приведены чертежи и фотоснимки керамических изоляторов, применяемых внутри мощных генераторных ламп.

Требованиям, предъявляемым к вакуумным изоляторам, хорошо удовлетворяет высокоглиноземистая пористая керамика типа алюминоксида (на основе жженого глинозема или коракса). Такая керамика находит широкое применение также в американской электровакуумной технике. В Германии для вакуумных приборов фирма Стемаг выпускала пористую фреквенту, называемую кенан, а также магнезиаль-

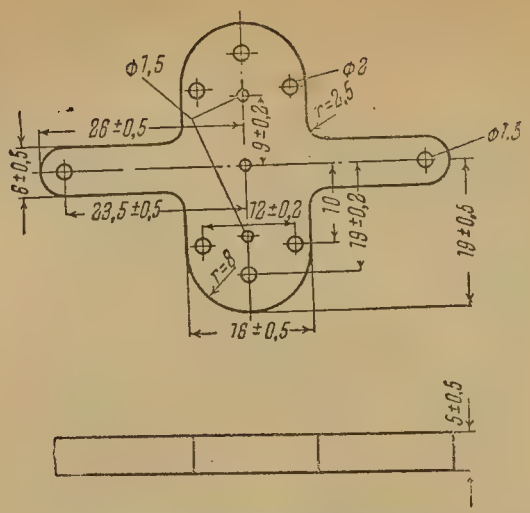


Рис. 106. Внутриламповый изолятор из пористого алюминоксида.

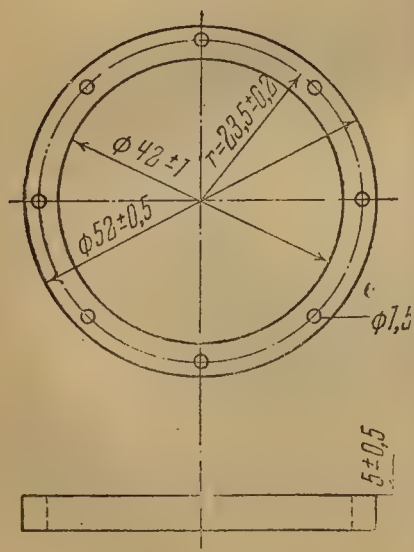


Рис. 107. Внутриламповый изолятор из пористого алюминоксида.

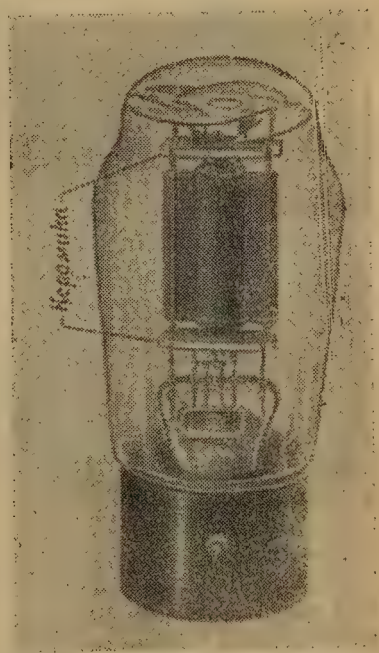


Рис. 108. Керамическая изоляция внутри электронной лампы.

ную керамику с компонентами—чистыми окислами, так называемый эрган.

Возможность применения для вакуумных приборов пористых изоляторов облегчает чрезвычайно трудный технологический процесс (главным образом, обжиг) изготовления алюминоксидной и магнезиальной керамики. Конечно, керамика для радиоламп, применяемая в цепях высокой частоты при высоких температурах, должна быть безглинистой. Оформление массы в изделия осуществляется, главным об-

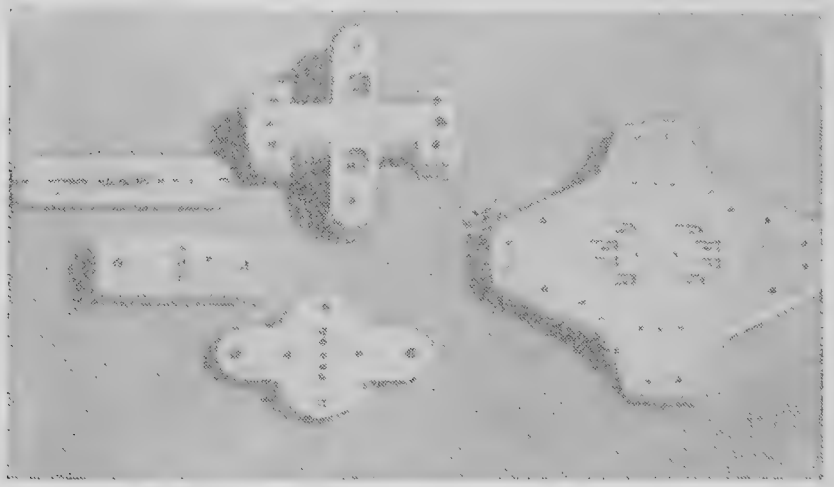


Рис. 109а. Внутриламповые керамические изоляторы.

разом, методом прессовки порошкообразной массы, содержащей органическую связку. Иногда оформление массы в изделия производится путем выдавливания ее через мундштук; так получают тонкостенные трубчатые изоляторы малого диаметра. В этих случаях пластичность массы также обеспечивается за счет органического пластификатора, выгорающего в процессе обжига. Высокая точность размеров вакуумных изоляторов является необходимым условием их использования. Точные размеры изоляторов достигаются путем вариации температуры, времени обжига отпрессованных изоляторов и давления при прессовке. При разных температурах обжига происходит различная усадка изделий, благодаря чему и достигаются нужные размеры. Обжиг вакуумных изоляторов производится в электрических печах, температура в которых может легко регулироваться.

Ниже приведены свойства союзной вакуумной керамики.

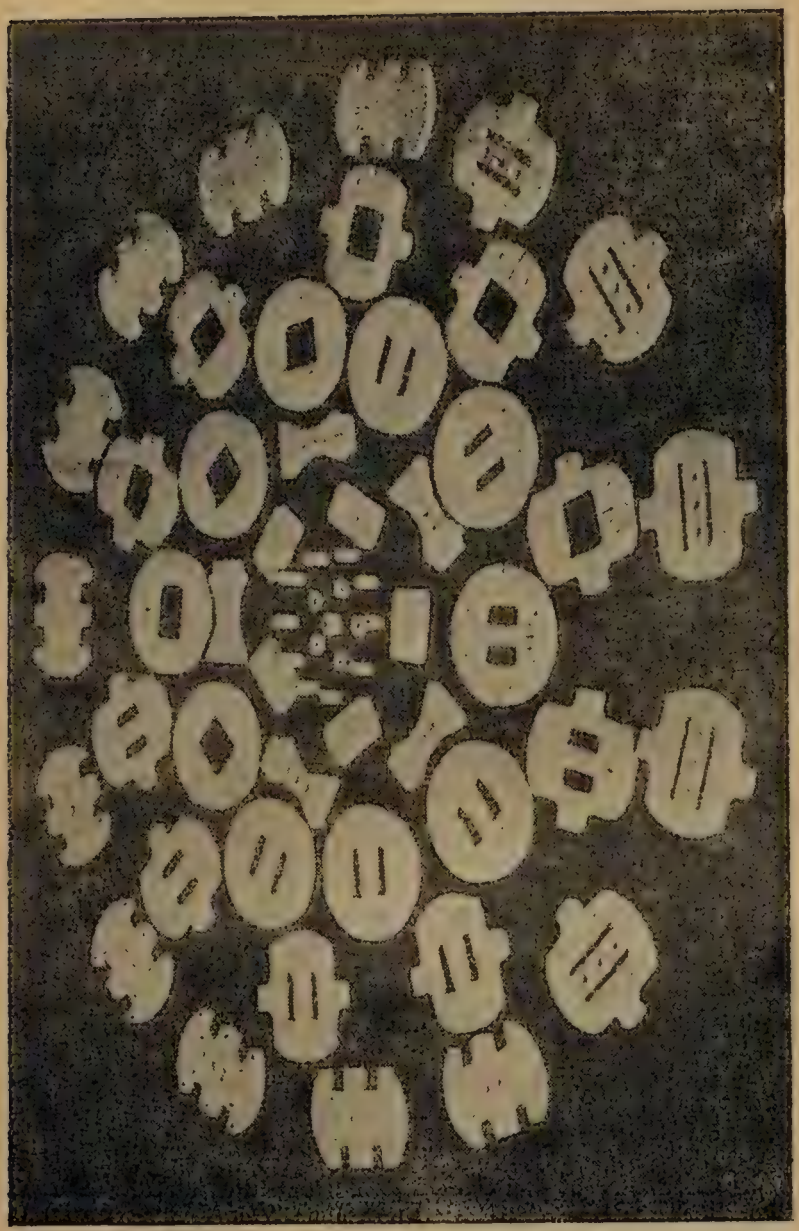


Рис. 1096. Внутриламповые керамические изоляторы из пористого алюминоксида.

Свойства вакуумной керамики

Свойства	Наименование керамики	
	Пористый алюминоксид	Пористый радиостеатит
Угол потерь при радиочастотах (в мин.) $t = 20$	0,5—1	0,1—1,5
$t = 300$	2—5	2—4
Диэлектрическая проницаемость	5—6	4—5
Температурный коэфициент диэлектрической проницаемости в пределах 200°—300°	$+ 140 \cdot 10^{-6}$	—
Удельное объемное сопротивление (в *ом · см*) $t = 100$ °С	10^{13}	10^{13}
$t = 300$° С	10^{12}	$5 \cdot 10^{11}$
Плотность (в *г/см*^{3})	2,5	2,0
Временное сопротивление изгибу (в *кг/см*^{2})	600—800	350—550
Удельная ударная вязкость (в *кг · см/см*^{2})	2—3	1,5—2,0
Коэфициент линейного расширения	$5,5 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^{-6}$
Теплопроводность (в *вт*/° С · *см*)	0,08	0,015
Водопоглощение, в %	10—15	10—15

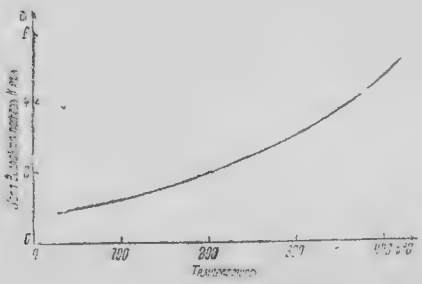


Рис. 110. Зависимость угла диэлектрических потерь пористой вакуумной керамики от температуры при $f = 1 \cdot 10^6$ *гц*.

На рис. 110 представлена зависимость угла диэлектрических потерь от температуры для пористой вакуумной керамики.

Глава XIII

МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

§ 52. Классификация керамических деталей по технологическим признакам

Выбор того или иного метода оформления изделий зависит от ряда условий:

1. Конфигурации детали.

2. Требуемой точности размеров; различные методы оформления изделий позволяют при массовой технологии различную точность размеров.

3. Требований к электрическим и физико-механическим характеристикам детали; в зависимости от этих требований выбирается тот или иной вид керамики, а следовательно и технологические приемы оформления изделий.

4. Степени массовости заказа на данную партию изделий.

Детали, изготовляемые из радиокерамики, можно разделить на шесть групп, соответственно технологическим приемам их оформления.

1. Плоские детали относительно небольших размеров, выполняемые методом прессовки сухого порошка, например, ламповые панели, конденсаторные платы, втулки и т. д. Обычно путем прессовки получают непосредственно готовую деталь, нуждающуюся только в обжиге. Однако, в некоторых случаях, например, при незначительных количествах однотипных деталей, когда изготовление специальной прессформы неэкономично, посредством прессовки изготовляют заготовки простой формы, которые далее подвергаются механической обработке на фрезерных, сверлильных, токарных станках.

2. Детали—тела вращения; для их изготовления сначала из пластичной массы выполняются заготовки на формовочном (гончарном) станке, которые затем обтачиваются в просушенном состоянии на токарных станках. Указанным методом выполняются ребристые изоляторы, высоковольтные конденсаторы горшкового типа и пр.

3. Детали, изготовляемые путем выдавливания пластичной массы через мундштук с последующей механической доработкой заготовок в подсушенном состоянии. Таким способом изготовляются детали удлиненной формы, например, антенные стержневые изоляторы, планки, тонкостенные трубочки, звездчатые многогранные каркасы катушек и др.

4. Детали сложной конфигурации и небольших размеров, рассчитанные на массовый выпуск, изготовляемые путем штамповки на ударных прессах (метод пластичной прессовки).

5. Детали очень большого размера (бушинги, мачтоопорные изоляторы), изготовляемые путем литья жидкой керамической массы в гипсовые формы с последующей обработкой на горизонтальных и вертикальных (формовочных) токарных станках. Этот же способ используется иногда для изготовления тонкостенных цилиндров из непластичных керамических масс.

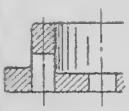
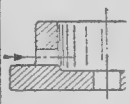
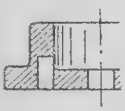
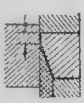
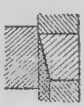
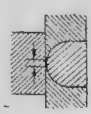
6. Детали, изготовляемые из керамики, пластичность которой достигается введением органических пластификаторов.

Выбор конфигурации детали, а следовательно, и рабочего инструмента (прессформ, штампов, шаблонов), производится с учетом свойств керамических масс.

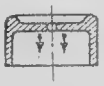
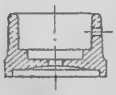
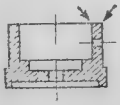
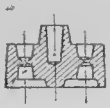
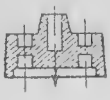
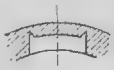
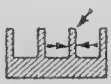
Руководящие указания в этом отношении можно получить из данных таблицы 13, заимствованной из литератур-

Примеры правильных и неправильных конструкций керамических деталей

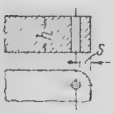
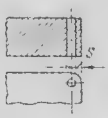
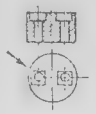
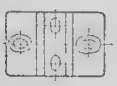
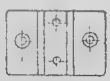
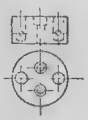
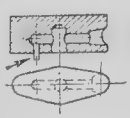
Прессованные керамические детали

Правильно	Неправильно
Ребра, выступы и т. п. имеющие небольшую конусность облегчают прессовку и выталкивание прессованных деталей.	При выталкивании вертикальные стенки откалываются.
1	
 Боковое отверстие, образованное снизу при помощи штифта в инструменте. Этим достигается применение простого инструмента и быстрой прессовки	 Боковое отверстие, требующее применения дорогого инструмента с боковым штифтом; процесс прессовки, благодаря этому, сильно удлиняется
2	
 Боковая внутренняя выборка, образованная снизу при помощи штифта в инструменте. Этим достигается применение простого инструмента и быстрый процесс прессовки.	Внутренняя выборка едва-ли выполнима. Очень дорогой верхний пуансон.
3	
Хорошая прессовка при равномерном уплотнении.	Прессованные детали с наклонными стенками имеют неравномерное уплотнение.
4	
 Цилиндрическая часть в прессованной детали сохраняет инструмент и обеспечивает четкие края прессованной детали.	 Острый край нижнего пуансона ударяется о верхний пуансон: невыполнимо.
5	
 Цилиндрическая часть в прессованной детали сохраняет инструмент и дает аккуратный переход.	Здесь ударяются друг об друга два острых края пуансонов; невыполнимо
6	

Прессованные керамические детали

Правильно	Неправильно
Малая поверхность основания в данном случае удешевляет шлифовку	Большая площадь основания, плоскопараллельность которой достигается только полной сошлифовкой.
7	
Внутренние своды препятствуют провисанию при обжиге.	 Свободные прямые поверхности искривляются, поэтому необходимо применение опорной болзы (смотри Ер 6).
8	
 Края закруглены, получается хорошая выпрессовка; избегается брак глазуровки. Вертикальные поверхности скошены по 1.	 Перпендикулярные вертикальные поверхности, плохая выпрессовка и съемка нет сводчатых оснований. Глазурь стекает с острых краев или просвечивает
9	
 Конические отверстия легкое выталкивание. Вогнутые основания отверстий не пристают к пуансонам. Опора на дне (в центре) препятствует провисанию.	 Цилиндрические отверстия и плоское дно обуславливают плохое выталкивание. Без опоры основание провисает при обжиге.
10	
 Толстые стенки лучше противостоят разрывам при обжиге. Вырезы обеспечивают легкое выталкивание.	Тонкие стенки разрываются или искривляются. Отсутствие вырезов приводит к обрыванию краев при выталкивании
11	
Наклон ребер и закругленные края облегчают выпрессовку и выталкивание.	 Слабые перпендикулярно поставленные ребра с острыми углами плохо выпрессовываются, обрываются при выталкивании или при обжиге.
12	

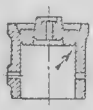
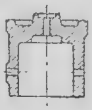
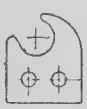
Прессованные керамические детали

Правильно	Неправильно
Закругленные углы препятствуют обламыванию края.	Край с острыми углами обламывается
13	
 Высота „h" мм / Толщина стенки „S" мм: до 10 — $\frac{h}{4}$ не меньше 1; 11 – 20 — $\frac{h}{5}$ до $\frac{h}{3}$ не меньше 3,5; свыше 20	 Отверстие слишком близко к внешнему краю. Стенка слишком слаба, края стенки растрескиваются и ломаются
14	
В углубленной четырехугольной выемке, если возможно, внешний край оставить открытым	 Толщина стенок слишком слаба. Края стенки растрескиваются или ломаются
15	
 Продолговатые отверстия дают возможность выбора размеров (облегчают монтаж)	 Круглые отверстия обуславливают трудности в смысле подгонки расстояний
16	
 При боковых отверстиях, лежащих параллельно друг другу возможна прессовка с боковыми штифтами	Боковые отверстия пересекаются. Выполнение их возможно только при последующем сверлении образца
17	
Для ручки с креплением в середине требуется очень простая прессформа	 Для ручки с боковым креплением требуется дорогой инструмент с боковым штифтом, а стопор замедляет прессовку.
18	

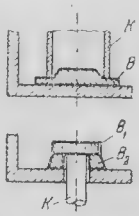
Прессованные керамические детали

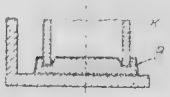
Правильно	Неправильно
Начало нарезки сужается. Исключено образование острых краев	Нарезка нарезается до конца. Край отламывается.
19	
Крупная нарезка. Нарезка болта короче, чем нарезка гайки. Наружные плоскости точно подходят одна к другой, благодаря закруглению краев.	Нарезка слишком мелка. Нарезка болта слишком длинна. Обе наружные плоскости плохо соединяются.
20.	
Отверстия для вмазывания замазкой металлических болтов (по возможности без нарезки.)	Метрическая нарезка с излишне мелким шагом. Трудно выполнима.
21	
Отверстия для крепления высверливаются в круглой части, просты в изготовлении и предохраняются от поломки.	Отверстия для крепления выполненные снаружи, удорожают инструмент. Происходит поломка прессованных деталей.
22	
Стрелка на поверхности удешевляет инструмент.	Благодаря выступающей стрелке удорожается инструмент и имеют место поломки
23	
Круглые формы без внутренних выточек удешевляют инструмент.	Некруглые формы с внутренними выточками определяют высокую стоимость инструмента.
24	

Прессованные и тянутые через мундштук керамические детали

Правильно	Неправильно
Простая накатка в направлении прессовки (вертикальная) проста и поэтому дешева.	Корзиночная или перекрещивающаяся накатка удорожает инструмент и прессовку
25	
 Плоские монтажные поверхности с канавками для глазури. Вздутий глазури не получается.	 Без канавок для глазури на монтажных поверхностях легко возникают неровности и вздутия глазури.
26	
Примеры керамических деталей, получаемых протяжкой через мундштук	
Благодаря равномерно расставленным каналам избегают неблагоприятного распределения массы.	Вследствие неблагоприятного распределения массы между каналами возникает скручивание детали.
27	
Поперечный разрез с правильным распределением массы.	Неблагоприятное односторонее скопление массы
28	
Края выполняются по возможности тупоугольными и закругленными	Слабые и острые края предопределяют брак благодаря трещинам и выкрашиванию.
29	
 Отверстия выравнивают площадь поперечного сечения	Неравномерная толщина обуславливает закручивание при протяжке
30	

Бомзы (подставки для обжига)





Правильно	Неправильно
31 Капсель для обжига 33	32 31 Бомза В для полых цилиндров (К) среднего размера 32 Бомза В для полых цилиндров большего размера. 33 Бомза B_1 B_2 для полых цилиндров и трубок подвешиваемых при обжиге.

Обжиг изделий

Правильно	Неправильно
Деталь следует обжигать с бомзой. Опорную поверхность S не следует глазуровать.	Без бомзы деталь искривляется, будет не круглая. Полная глазуровка не возможна.
34	
Обжиг детали на круглой бомзе дает большую устойчивость положения и делает возможным глазуровку торцевых плоскостей.	Обжиг на малом основании не целесообразен. Полная глазуровка невозможна
35	
Опорная бомза препятствует искривлению	Подрезанные или опорные части без бомзы искривляются
36	
Бомза сохраняет образец круглым.	При обжиге без бомзы край искривляется.
37	

ных источников, где рассматривается правильное и неправильное конструирование детали.

Общая продолжительность технологического процесса изготовления изделий составляет 1—20 дней в зависимости от типа детали, принятого метода изготовления, наличия или отсутствия готовой массы, готового инструмента, типа печи (ее тепловой инерции) и других условий.

§ 53. Точность размеров керамических деталей

Точность размеров керамической детали зависит от ряда факторов:

1. Правильного выбора технологического процесса оформления изделий данной конфигурации.
2. Технической культуры производственного процесса, поскольку ею определяется воспроизводимость усадочных коэфициентов.
3. Абсолютной величины усадочных коэфициентов, свойственных той или иной массе и методу оформления изделий.
4. Размеров изделия.

Величина усадочных коэфициентов керамики определяется:

1. Физико-химическими особенностями керамической массы.
2. Давлением на массу при оформлении изделия, которое зависит от конфигурации мундштука при протяжке, удельного давления при сухой прессовке и пр.
3. Степенью влажности массы.
4. Гранулометрическим составом массы.
5. Особенностями сырьевых материалов (температура тощих компонент, химический состав сырьевых материалов).

Наибольшая точность размеров получается в случае прессованных изделий, где фиксировано удельное давление и влажность порошка мала. Размеры таких деталей удается выдержать с точностью до $\pm 1\%$, но не менее $\pm 0{,}1$ *мм*. Формованные, тянутые или штампованные изделия отличаются меньшей точностью размеров; обычно она составляет, как правило, $\pm 2—3\%$.

Абсолютная величина неточности размеров (допуск) возрастает с увеличением размеров изделия нелинейно; для малых размеров изделия допуск составляет определенную минимальную величину (обычно 0,1 — 0,2 *мм*). Поэтому относительная неточность размеров падает с увеличением линейных размеров. Для небольших деталей относительное отклонение размеров от заданных велико, хотя абсолютная величина погрешности меньше, чем у больших деталей.

Практически для получения точных по размеру изделий необходимо изготовить из данной партии сырьевых материалов и из данных заготовок (протянутых, прессованных

и др.) пробные образцы и установить для них величины усадочных коэфициентов. По этим усадочным коэфициентам производится обработка всей партии изделий. Таким путем можно достигнуть в отдельных случаях точности, отвечающей 5—6 классу для металлических изделий.

Детали, допускающие шлифовку после обжига (оси, платы, сферические изделия) могут быть получены с точностью до ± 0,01 *мм*. В таблице 14 показаны допуски на

Таблица 14

Допуски на размеры керамических деталей, принятые в иностранной технике

Пределы размеров по ширине и длине свыше	до	Большой допуск ± допуск	Большой допуск Допуск в одну сторону положительн или отрицат.	Средний допуск ± допуск	Средний допуск Допуск в одну сторону положительн или отрицат.	Малый допуск
0,5	2	0,2	0,4	0,1	0,2	Принимается по особой договоренности
2	4	0,4	0,8	0,15	0,3	
4	6	0,6	1,2	0,2	0,4	
6	8	0,7	1,4	0,25	0,5	
8	10	0,8	1,6	0,3	0,6	
10	13	1,0	2,0	0,35	0,7	
13	16	1,2	2,4	0,4	0,8	
16	20	1,2	2,4	0,45	0,9	
20	25	1,5	3,0	0,5	1,0	
25	30	1,5	3,0	0,55	1,1	
30	35	2,0	4,0	0,6	1,2	
35	40	2,0	4,0	0,65	1,3	
40	45	2,0	4,0	0,7	1,4	
45	50	2,5	5,0	0,8	1,6	
50	55	2,5	5,0	0,9	1,8	
55	60	2,5	5,0	1,0	2,0	
60	70	3,0	6,0	1,2	2,4	
70	80	3,5	7,0	1,4	2,8	
80	90	4,0	8,0	1,6	3,2	
90	100	4,5	9,0	1,8	3,6	
100	110	5,0	10,0	2,0	4,0	
110	125	5,5	11,0	2,2	4,4	
125	140	6,0	12,0	2,5	5,0	
140	155	6,5	13,0	2,8	5,6	
155	170	7,0	14,0	3,0	6,0	
170	185	7,5	15,0	3,4	6,8	
185	200	8,0	16,0	3,8	7,6	
200	250	9,0	18,0	—	—	
250	300	10,0	20,0	—	—	
300	350	11,0	22,0	—	—	
350	400	12,0	24,0	—	—	
400	450	13,0	26,0	—	—	
450	500	14,0	28,0	—	—	
500	700	± 3%				
700	1000	± 2½%				
1000	2000	± 2%				
свыше 2000		± 1½%				

размеры радиокерамики, принятые в иностранной технике, а на рисунке 111 приведены зависимости допусков при разных габаритах изделий.

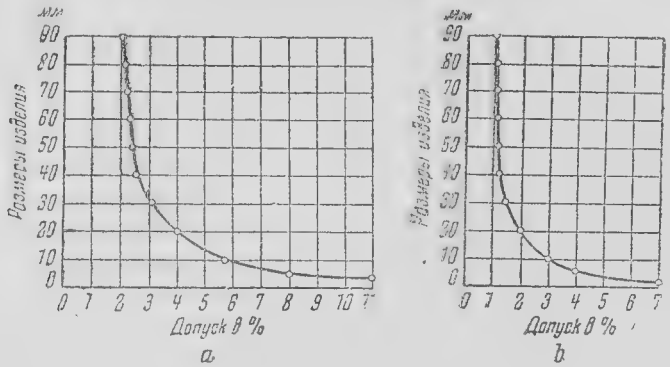


Рис. 111. Зависимость точности размеров керамических деталей, изготовленных методом сухой прессовки, от их размеров.
a — обычные детали; *b* — детали с высокой точностью размеров.

§ 54. Глазурование радиокерамики

Многие детали, с целью обеспечения изящного внешнего вида и предохранения поверхности изделий от загрязнения в процессе монтажа, покрываются глазурью.

Глазурь представляет собой особый вид стекла, обычно непрозрачного. Состав глазури выбирается таким, чтобы, с одной стороны, происходило стеклование при температуре обжига керамики, а с другой стороны, обеспечивался необходимый коэфициент теплового расширения глазури, не превосходящий коэфициент расширения основы (черепка).

Нанесение глазури производится в зависимости от размеров и вида изделия или после воздушной сушки их при влажности изделий 1—2% (например, в случае стержневых изоляторов), или после утильного обжига. Тонкостенные детали глазуруются только после утильного обжига.

Влияния глазури на электрические свойства деталей и на их влагостойкость обычно не наблюдается. Отсутствие гигроскопичности керамики обусловливается полной спеченностью черепка и, следовательно, отсутствием пористости. Поэтому глазуровка деталей с точки зрения гигроскопичности и диэлектрических потерь, конечно, не обязательна. В случае титановой керамики глазурь может служить защитой от образования на поверхности проводящих мостиков под воздействием дугового разряда.

Механическая прочность керамики, покрытой глазурью, уменьшается или увеличивается в зависимости от соотно-

шения коэфициентов расширения глазури и керамического черепка. Если коэфициент расширения глазури заметно больше, чем керамики, поверхностный слой оказывается растянутым и механическая прочность изделия резко снижается (до 50%). Наоборот, в случае глазури с коэфициентом расширения несколько меньшим, чем у керамики, прочность изделия повышается до 1,5 раз. Для радиофарфора разработана тальковая глазурь серовато-зеленого цвета. Механическая прочность изделий, покрытых этой глазурью повышается на 15—20%.

Наряду с глазурями высокого обжига, для оформления деталей из радиокерамики применяются глазури с температурой плавления 700—800°, наносимые на уже спеченный черепок.

Глазури низкого обжига предназначаются для керамики с большим коэфициентом расширения—радиостеатита, тиконда разных марок, а также керамики с очень высокой температурой спекания, например, алюминоксида.

Кроме того, низкоплавкие глазури применяются для склейки отдельных частей деталей сложной конфигурации, например, для склейки гребенок шаровых вариометров. Наконец, с помощью легкоплавких глазурей возможно повысить разрядные напряжения керамических высоковольтных высокочастотных конденсаторов. В последнем случае глазурь наносят поверх серебряных слоев, служащих электродами конденсатора, вдоль края этих электродов.

Состав легкоплавких глазурей выбирают, исходя из коэфициента линейного расширения керамики, причем обычно в качестве компонент шихты используют свинцовый сурик борную кислоту, кварцевый песок, плавиковый шпат, каолин.

§ 55. Схема технологического процесса изготовления керамических деталей из радиофарфора

Изготовление керамических деталей выполняется по следующей схеме:

1. Подготовка сырьевых материалов.
2. Приготовление массы.
3. Оформление массы в изделие (прессовка, формовка, протяжка и др.) и дополнительная механическая обработка.
4. Сушка и отбраковка.
5. Глазуровка.
6. Зачистка.
7. Обжиг.
8. Отбраковка после обжига и испытания.

§ 56. Подготовка сырьевых материалов и приготовление массы

Все сырьевые материалы подвергаются химическому анализу, а затем сортировке—наружному осмотру и очистке от прослоек песка, железистых включений, угольной пыли

и других примесей. Отощающие материалы, жженый каолин, кварц, череп, после сортировки и обжига (если он производился) подвергаются дроблению на бегунах, просеиваются через сито № 8 (64 *отв/см*²) или № 9 (81 *отв/см*²) и загружаются в лари или бункера, где хранятся до употребления. Сырьевые материалы отвешиваются по рецептуре с учетом влажности сырья. Тонкий размол и смешивание всех компонент массы производится мокрым способом в шаровых мельницах с шарами из кремневой гальки и фарфоровой или кремневой футеровкой. Вначале загружаются отощающие материалы — жженый каолин, жженая глина, череп, углекислый барий. Соотношение веса материалов, воды и шаров берется 1 : 1,5 : 1,3. Степень измельчения компонент контролируется посредством очень мелких металлических сит. Тонина помола должна соответствовать остатку на сите 10000 *отв/см*² 0÷2%. После измельчения отощающих материалов в мельницу загружается пластичное сырье и добавляется вода в отношении 1 : 1,5 к весу пластичных. Длительность размола отощающих компонент обычно составляет 12 — 16 часов; смешение их с пластичными компонентами длится 4—5 часов. Число оборотов мельницы в зависимости от диаметра барабана лежит в пределах 30 — 60 *об/мин*. Измельченная жидкая масса проходит через сито 10000 *отв/см*² с остатком от 0% до 1,5 — 2%. После помола масса пропускается через магнитный сепаратор для удаления металлического железа и через сито 900 — 1600 *отв/см*² для отделения механических включений.

Обезвоживание массы производится в фильтрпрессах или в гипсовых формах. Обезвоженная в фильтрпрессе масса представляет собой плотные коржи с влажностью около 22—25%.

В зависимости от дальнейшего технологического процесса оформления изделий масса после фильтрпресса подвергается высушиванию или непосредственно используется для формовки или протяжки.

§ 57. Изготовление изделий методом сухой прессовки

Метод сухой прессовки применяется при изготовлении плоских деталей относительно небольшого размера с отверстиями, незначительными выступами и углублениями.

Использование этого способа обеспечивает высокую точность размеров деталей. Допуск на размеры детали в этом случае может быть принят равным $\pm (0{,}015\ a + 0{,}1)$, где a — размер детали.

Выпуск несложных деталей при одном рабочем и прессовке на одном ручном гидравлическом прессе за смену составляет 200 — 400 штук. При наличии специального

механического пресса выпуск может быть значительно увеличен.

Высокая точность размеров прессованных деталей основана на зависимости усадки изделия от удельного давления при прессовке (рис. 112), благодаря чему можно получить в известных пределах определенный усадочный коэфициент. Величина усадочного коэфициента определяется отношением размеров изделия в сухом состоянии до обжига к тем же размерам после обжига.

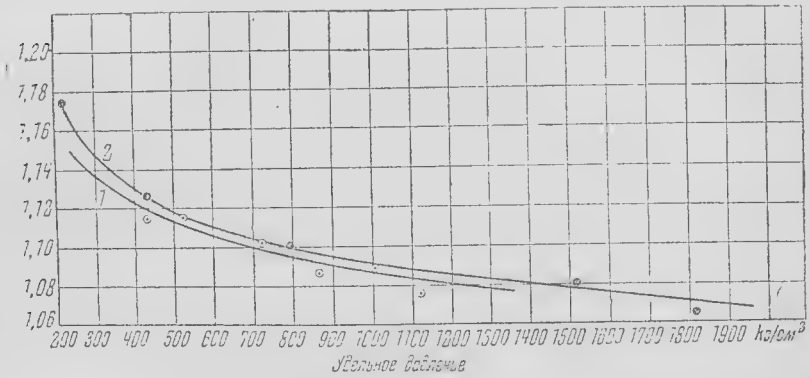


Рис. 112. Зависимость усадочного коэфициента от удельного давления при прессовке.
1—изоляторный фарфор; 2—радиофарфор.

Имея прессформу, изготовленную по некоторому среднему коэфициенту усадки для данной массы, можно путем выбора давления обеспечить необходимые размеры детали.

Приводим зависимость усадочного коэфициента по плоскости и высоте от давления при прессовке для радиотехнического фарфора.

Зависимость усадочного коэфициента от давления для радиотехнического фарфора

Удельное давление в *кг/см²*	Усадочный коэфициент	
	по плоскости	по высоте
100	1,17	1,19
200	1,15	1,17
400	1,13	1,15
600	1,11	1,13
800	1,10	1,12
1100	1,10	—

Массу, предназначенную для прессовки, сушат при 90°—100° до влажности 4—5%, а затем измельчают в дезинте-

граторе или вручную, в ступке и просеивают через сито 64—81 *отв/см²*. Высушенный порошок дополнительно увлажняется до 6—8% влаги. С целью равномерного распределения влаги в порошке, необходимо предусмотреть его вылеживание в течение около суток. Чтобы не происходило слёживания порошка, высота засыпки последнего в бункер не должна быть более 0,5 *м*. Развеска порошка устанавливается в зависимости от объема изделий. Необходимо пользоваться весовой, а не объемной дозировкой для обеспечения высокой точности деталей по высоте.

Расчет удельного давления при прессовке на гидравлическом прессе производится на основании известного соотношения:

$$S_{пл} \cdot P_{пл} = S_{изд} \cdot P_{изд}, \qquad (79)$$

где: $S_{пл}$ —площадь плунжера пресса в *см²*;
$P_{пл}$ —давление на 1 *см²* плунжера (показания манометра) в *кг/см²*;
$S_{изд}$ —площадь поперечного сечения изделия, нормальная к направлению прессовки в *см²*;
$P_{изд}$ —удельное давление на поперечное сечение изделия, в *кг/см²*;

Рабочие условия для прессовки:

1) однородная влажность и крупность порошка;
2) правильная дозировка и распределение прессовочного порошка в прессформе;
3) строгая выдержка заданного давления.

Конструкция прессформы для изготовления сложных деталей должна предусматривать отсутствие текучести прессовочного порошка, малую механическую прочность необожженных спрессованных изделий и проч. Поэтому прессформа должна быть снабжена выталкивателем, обеспечивающим аккуратное выпрессовывание деталей, или быть разъемной. Чертеж прессформы для прессовки сухого порошка приведен на рис. 113 в.

Необходимым условием при прессовке является равномерное распределение прессовочного порошка в прессформе. В противном случае изделия трескаются, коробятся во время обжига вследствие неравномерной усадки.

В случае отсутствия сложной прессформы, позволяющей выпускать готовое изделие, применяются простые прессформы, в которых прессуется заготовка изделия. Механическая обработка заготовки производится только после упрочнения ее обжигом при 700—800° или пропиткой органическим составом (парафином). Последний способ более предпочтителен, так как при механической обработке пропитанная керамика не дает тонкой пыли.

Рис. 113а. Прессовка керамических деталей.

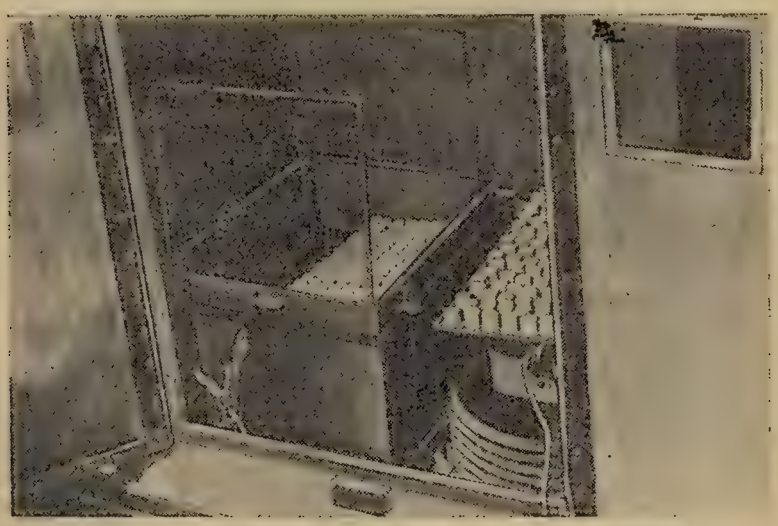


Рис. 13б. Шкаф для пропитки керамических заготовок.

Детали сложной конфигурации с выступами и впадинами более 5,0—6,0 *мм* не могут быть отпрессованы в готовом виде и требуют дополнительной механической обработки прессованных заготовок.

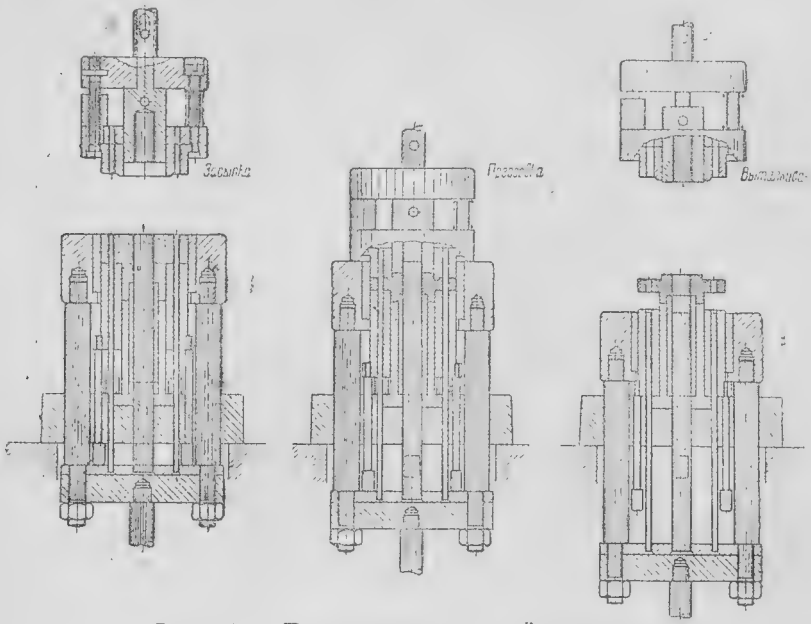


Рис. 113в. Прессформа для сухой прессовки

На рис. 114 представлена деталь, которая выполняется прессовкой в готовом виде. На рис. 115—прессовка высоких изделий (трубок, цилиндров), которая должна произ-

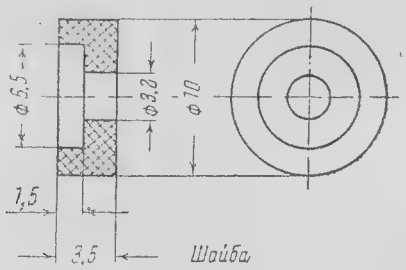


Рис. 114. Шайба.

водиться двусторонним давлением (два подвижных пуансона). Такой метод прессовки дает возможность устранить конусность изделия, получающуюся при одностороннем

давлении, вследствие неравномерного распределения давления по высоте цилиндра из-за большего трения между массой и стенками матрицы. В связи с указанным, при изготовлении деталей большой высоты методом сухой прессовки, нельзя обеспечить высокую точность размеров. Ролик (рис. 116) изготовляется в две операции. Сначала прес-

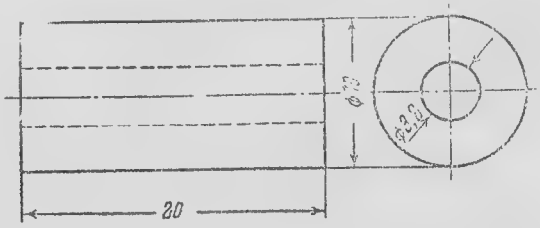


Рис. 115. Трубка изоляционная.

суется заготовка с отверстием (рис. 116а), затем заготовка парафинируется и далее идет на токарную обработку.

Изготовление указанной детали в одну операцию в готовом виде невозможно, т. к. выступающий бортик и глубокая впадина препятствуют равномерному распределению давления по высоте, отчего произойдет неравномерное спекание черепка.

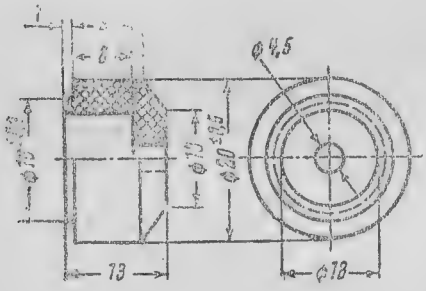


Рис. 116. Ролик.

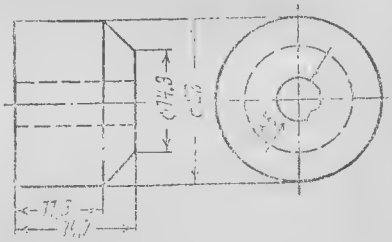


Рис. 116а. Заготовка ролика.

Детали, изображенные на рис. 117—120, также изготовляются в две операции. Вторая операция состоит в просверливании отверстий предварительно пропарафинированной заготовки и выпиливании зубцов специальным фрезом, о котором будет сказано ниже.

На рис. 121 изображена деталь, прессовка которой в готовом виде требует не увлажненного водой пресспорошка, а парафинированного. Парафинированный порошок приготовляется следующим образом: прессуются диски или прямо-

угольной формы пластинки толщиной 5—8 *мм*, высушиваются до влажности 1—2%, после чего погружаются в ванну с расплавленным парафином (температура 80° С) на 15—20

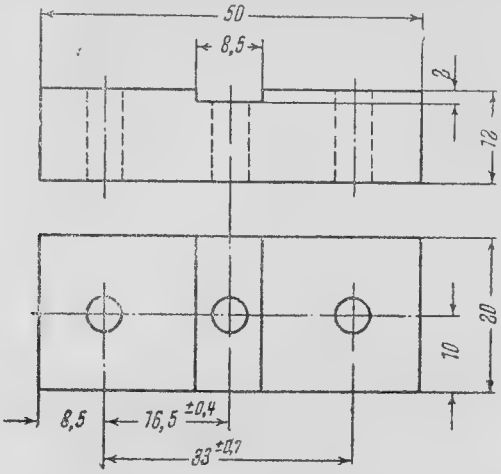


Рис. 117. Планка.

минут. Остывшие пластинки растираются в порошок, который пропускают через сито 144 *отв/см²*.

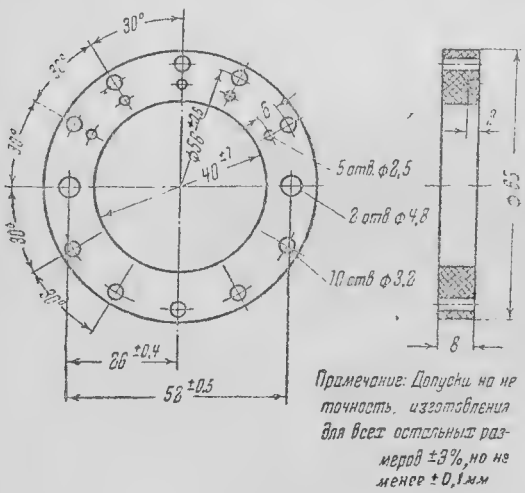


Рис. 118. Кольцо.

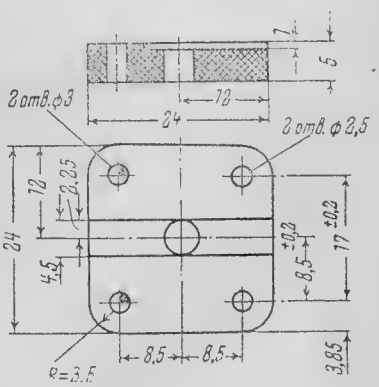


Рис. 119. Панель.

Детали, отпрессованные из нормального, непарафинированного порошка, сушат в камерной сушилке при максимальной температуре 110°. Детали при сушке уклады-

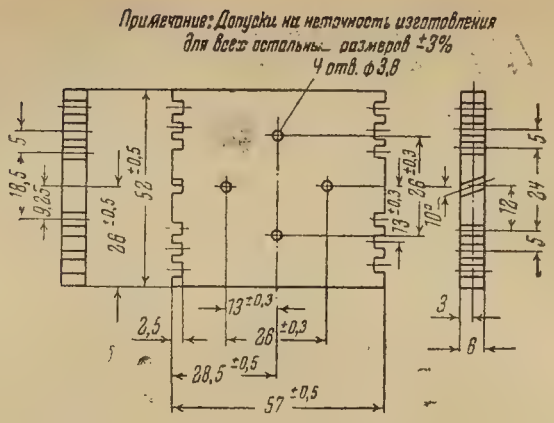


Рис. 120. Планка.

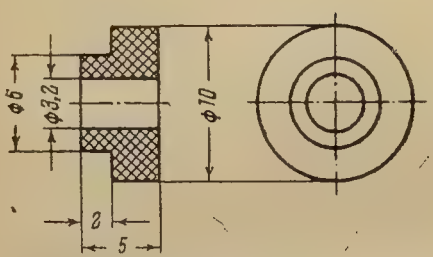


Рис. 121. Втулка.

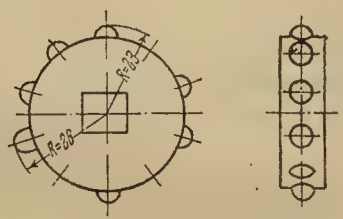


Рис. 122. Кольцо переключателя.

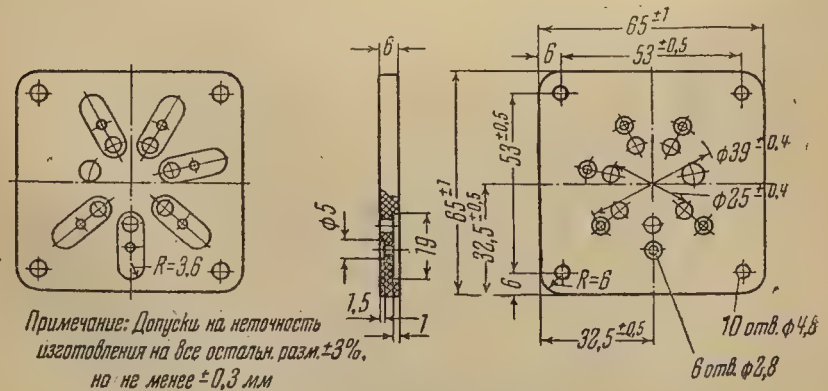


Рис. 123. Ламповая панель.

ваются раздельно. Температуру в камере следует повышать постепенно во избежание растрескивания изделий. Продолжительность сушки 4—5 часов.

Изделия, требующие дополнительной обработки после сушки, пройдя зачистку, парафинируются при температуре 80—90°. Продолжительность пропитки определяется толщиной изделия. Например, время пропитки ролика (рис. 116) составляет 20—25 минут.

Высушенные детали очищаются от пыли при помощи мягкой кисти или сжатым воздухом. Детали с трещинами, отколами и не соответствующие размерам, перед обжигом отбраковываются.

§ 58. Изготовление изделий методом протяжки массы через мундштук

Изделия удлиненной формы, гребенки, колодки, рейки, соединительные планки, оттяжковые антенные изоляторы, длинные трубки и другие подобные детали не могут быть изготовлены ни методом прессовки, ни методом свободной точки. Оба эти метода дают значительную деформацию изделий при обжиге, а при пластичной прессовке (штамповке), кроме указанного дефекта, часто получается пористый черепок.

Применение метода протяжки массы через мундштук при изготовлении перечисленных изделий в значительной степени устраняет отмеченные дефекты. Объясняется это тем, что частицы пластичной массы при выдавливании через отверстие мундштучного пресса уплотняются равномерно и располагаются в строго определенном направлении, вследствие чего происходит равномерная усадка по данному направлению.

Влажность пластичной массы радиофарфора после проминки ее на мялке Фора или Рейсмана и вылеживании в течение 2—3 суток должна быть различна в зависимости от конфигурации протягиваемой заготовки, и составляет для прямоугольного сечения 25 — 26%, для круглого 22 — 23%. Метод протяжки всегда требует дополнительной механической обработки, т. к. через мундштук, профиль которого соответствует очертаниям изделия до обжига, выдавливается только заготовка (без отверстий и других усложнений профиля). Протяжка массы обычно производится на вакуумтоншнейдере или на винтовом прессе непрерывно, вследствие чего необходимо производить разрезку изделий по мере их получения.

Окончательная обработка заготовок производится в подсушенном виде.

Чертеж мундштука для протяжки заготовок приведен на рис. 124.

Исходя из конфигурации изделий и необходимой механической обработки, все изделия удлиненной формы можно разделить на две группы.

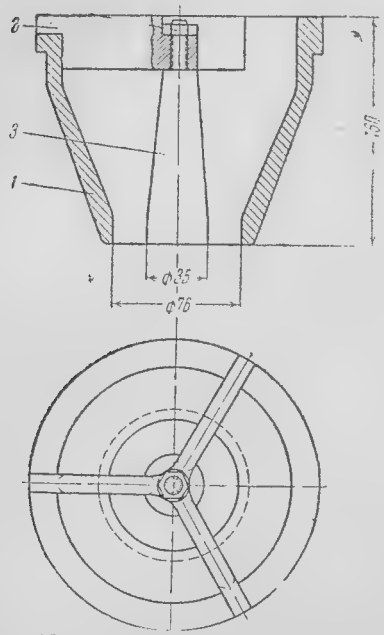


Рис. 124. Мундштук для протяжки керамики;
1—корпус; *2*—траверза; *3*—шпилька.

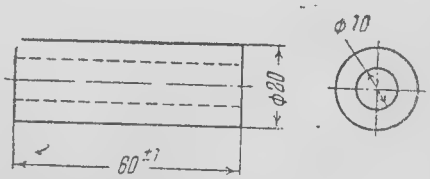
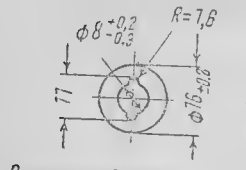


Рис. 125. Трубка.



Примечание: Допуски на неточность изготовления для всех остальных размеров ±3%

Рис. 126. Трубка.

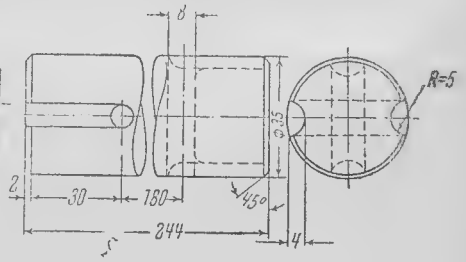


Рис. 127. Изолятор.

К первой группе следует отнести изделия, не требующие сложной механической обработки,—трубки гладкие, трубки с резьбой, оттяжковые антенные изоляторы и другие подобные детали (рис. 125—128).

Ко второй группе относятся изделия сложной конфигурации—гребенки, колодки, рейки, соединительные планки,

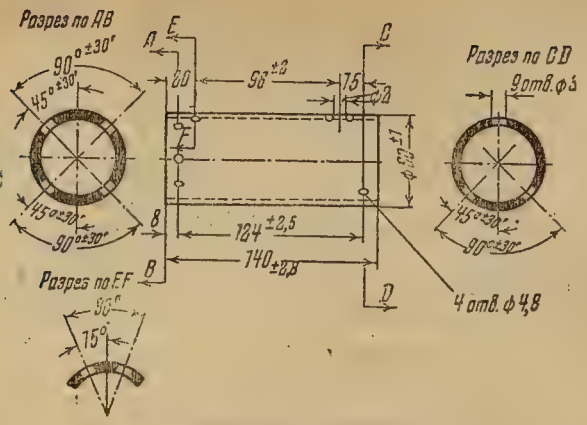


Рис. 128. Каркас катушки.

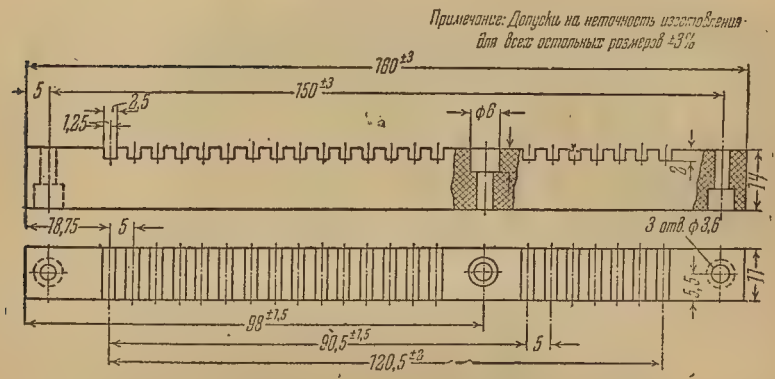


Рис. 129. Гребенка.

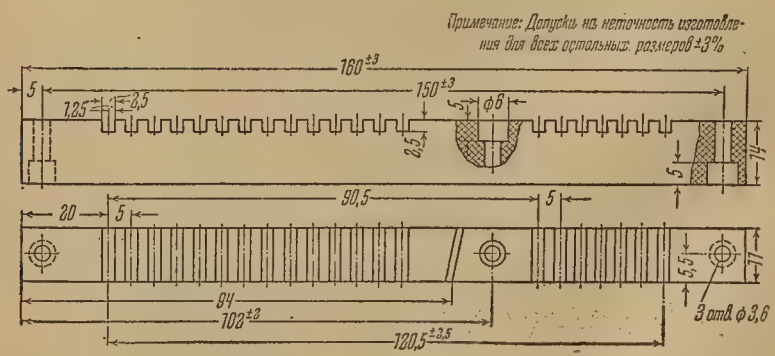


Рис. 130. Гребенка.

каркасы катушек индуктивности, т. е. детали, требующие сложной механической обработки (рис. 129—132).

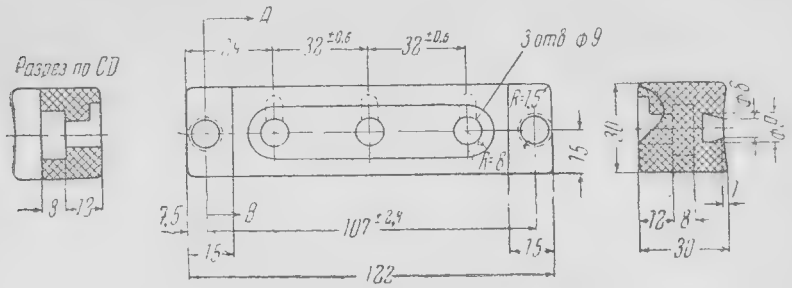


Рис. 131. Колодка.

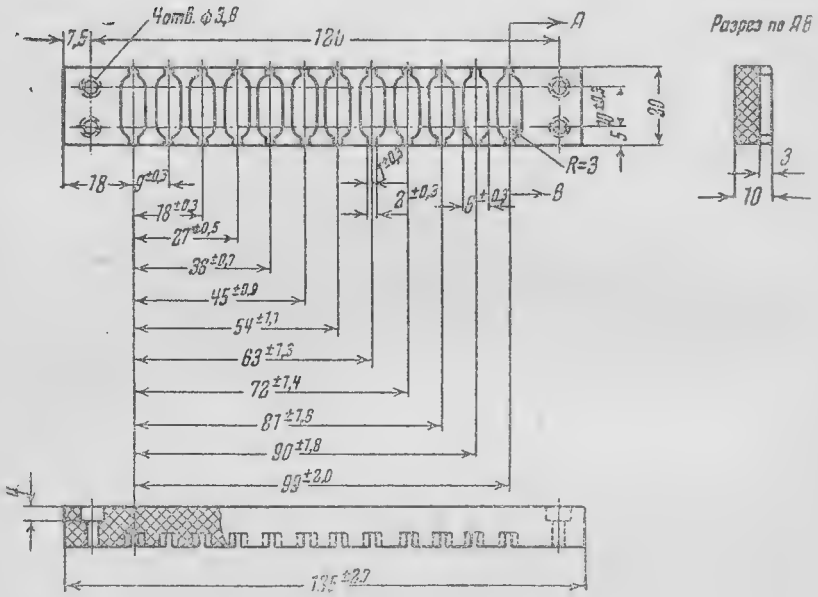


Рис. 132. Планка.

Схема изготовления изделий первой группы:

1. Переминка и вылёживание пластичной массы.
2. Протяжка заготовок, резка и подвяливание.
3. Обработка.
4. Сушка.
5. Зачистка и отбраковка.
6. Обжиг.

Схема изготовления изделий второй группы:

1. Переминка и вылёживание пластичной массы.
2. Протяжка заготовок, резка и сушка.
3. Предварительная обработка.
4. Пропитывание органическим составом (парафином).
5. Окончательная обработка.
6. Зачистка и отбраковка.
7. Обжиг.

1. Переминка пластичной массы

Механическая прочность изделий удлиненной формы в значительной степени будет определяться отсутствием в массе воздушных включений, которые после обжига детали оставляют в ней пустоты, раковины.

Обезвоздушивание производится пропусканием массы через вакуумтоншнейдер или, при отсутствии этого оборудования или ограниченном количестве массы, ручным способом.

Отсутствие воздушных включений узнается по срезу струной пласта массы толщиной 20—30 *мм*. Удаляются воздушные включения переминкой массы вручную на столе, покрытом полотном бельтинг.

2. Протяжка заготовок, резка и подвяливание

Обезвоздушенная масса сбивается в цилиндрической формы заготовку, которая плотно закладывается в цилиндр пресса. При протяжке радиофарфора приняты следующие коэфициенты усадки:

а) по диаметру мундштука	1,28
б) по диаметру подвяленной заготовки	1,20
в) по длине заготовки	1,13

Вытягиваемая, строго вертикальная заготовка принимается на лоток из парафинированной древесины. Подвяливание заготовок должно производиться на стеллажах при температуре 20°С ± 5° при 60—70% относительной влажности.

3. Обработка

Механическая обработка заготовок для изделий первой группы производится во влажном (подвяленном) состоянии с учетом коэфициентов усадки. Обработка подвяленных заготовок дает возможность устранить образующуюся при механической обработке сухих заготовок керамическую пыль, которая вредно отражается на здоровье рабочего и ускоряет износ оборудования. Изделия, полученные из обработки, поступают на окончательную сушку.

В случае изделий второй группы, подвяленная заготовка вначале грубо обрабатывается, затем сушится в термостате или сушиле при температуре 80 — 100°С до влажности

2—3%, пропитывается парафином при температуре 80—90° в течение 20—60 минут, в зависимости от толщины, после чего подвергается окончательной обработке.

Механическая обработка парафинированных заготовок изделий, представленных на рис. 120, 129, 130, производится на фрезерном станке специальным фрезом, который представляет из себя резец с наваренной победитовой пластинкой. Фрезеровка происходит при круговом вращении резца, закрепленного в фрезодержателе.

Сушка влажных керамических изделий производится в сушильных шкафах при максимальной температуре 70°С до влажности 5—7%.

Хорошие условия для сушки керамических изделий создаются при применении для этой цели токов высокой частоты или при включении изделий в цепь промышленной частоты. В последнем случае торцы изделия, предварительно подвяленного на воздухе, графитизируются и к ним подводится напряжение. Сила тока зависит от размеров изделия и регулируется включенным последовательно реостатом так, чтобы температура поверхности не превышала 60÷70°С.

При сушке изделий, имеющих сложную форму и резкие переходы, высыхание протекает неравномерно, что может привести к образованию трещин; подъем температуры при сушке таких изделий следует вести медленно.

§59. Изготовление изделий методом формовки пластичной массы

Изготовление деталей, изображенных на рис. 133—134, производится вручную методом формовки пластичной массы в гипсовых или деревянных формах, с последующей обработкой. Ручная формовка представляет собой довольно простой метод, не требующий дорогих и сложных приспособлений, но требующий большого навыка.

Формовочная масса должна иметь влажность 24—26%. Плотная масса, имеющая влажность ниже указанных пределов, не должна применяться, т. к. при формовке она дает трещины и раковины.

Деревянные формы делаются разъемными из пропитанной парафином, церезином или галоваксом древесины. Форма выполняется с учетом коэфициента усадки по сырой заготовке (1,28,—для радиофарфора).

Сам процесс формовки сводится к следующему. Отвешанная из расчета необходимой толщины изделия масса закладывается в форму и тщательно распределяется в ней. Сдавливание массы производится на винтовом прессе. Чтобы изделие не прилипало к стенкам формы, ее перед формовкой следует смазывать машинным маслом. Расформован-

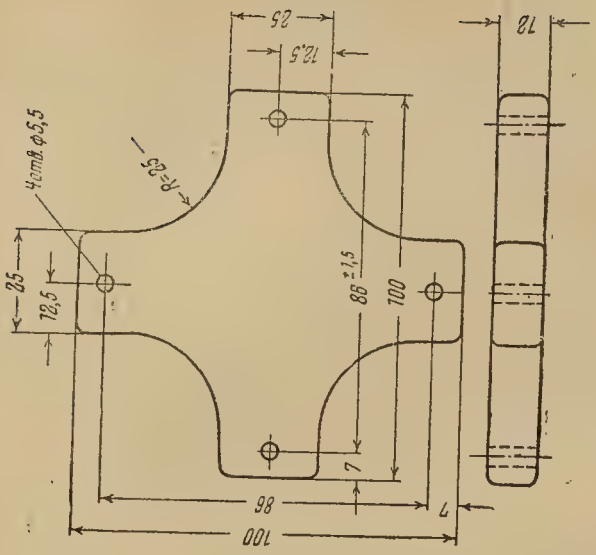


Рис. 134а. Крестовина.

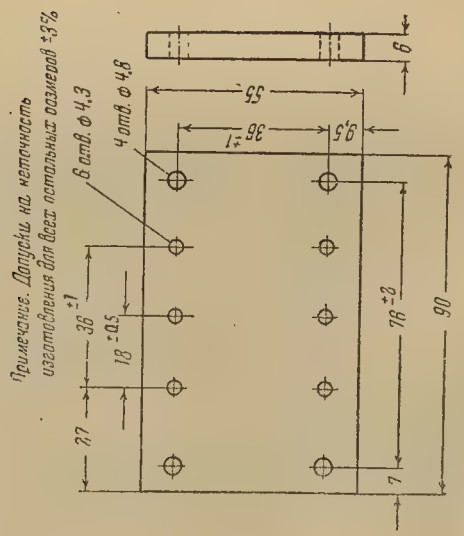


Рис. 133. Основание,

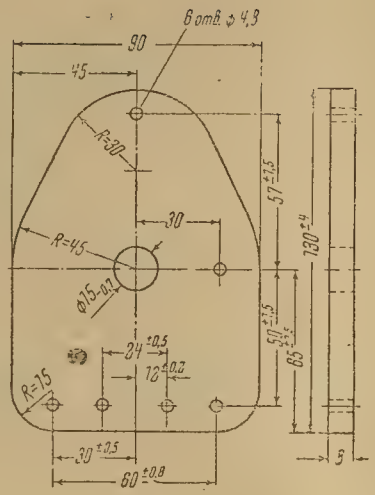


Рис. 134б. Щека.

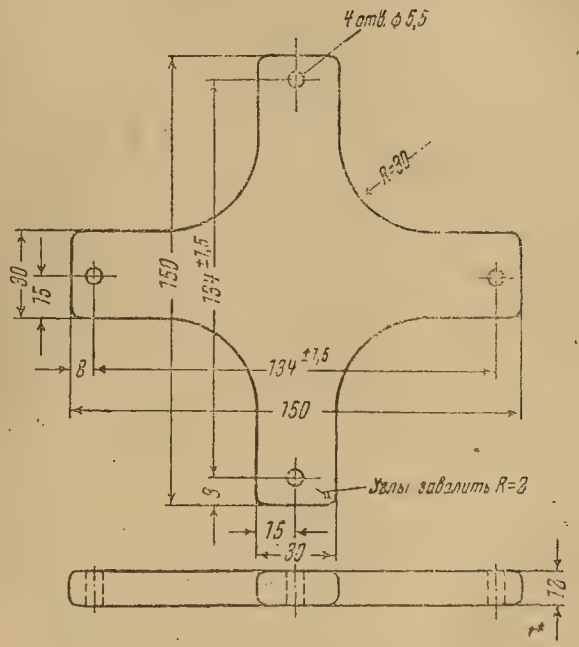


Рис. 134в. Крестовина.

ные изделия остаются подсыхать на нижнем вкладыше формы. Из-за большой влажности формовочной массы и больших размеров заготовок, их следует сушить особенно осторожно. Обработка отформованных и высушенных до влажности 5–7% заготовок производится по схеме изготовления изделий, подвергающихся пропитке парафином.

Формовка на вертикальном станке применяется для изготовления деталей, представляющих собой тела вращения (катушки, проходные и опорные изоляторы и др.). Сформованные на формовочном станке с шаблоном или без него детали обтачиваются на обычном токарном станке.

Рабочая влажность массы при формовке составляет 30–32%. Влажность болванок при обточке на токарном станке 15–20%. Подсушивание болванок производится при комнатной температуре в течение 2–3 суток. Сквозняки и одностороннее обогревание сырых болванок недопустимы. Коэфициенты усадки деталей, изготовленных методом формовки пластичной массы для радиофарфора, составляют примерно:

по диаметру 1,14 — 1,15,
по высоте 1,16 — 1,17.

Для деталей сложной конфигурации (с винтовой нарезкой, с точными отверстиями и проч.) обработка болванок на металлообрабатывающих станках: токарных, фрезерных и сверлильных производится не в сыром виде, а после парафинирования.

Из рисунков 135 и 136 видно, что заготовки из керамики обрабатываются таким же образом, как металлические.

Рис. 135. Механическая обработка керамических заготовок.

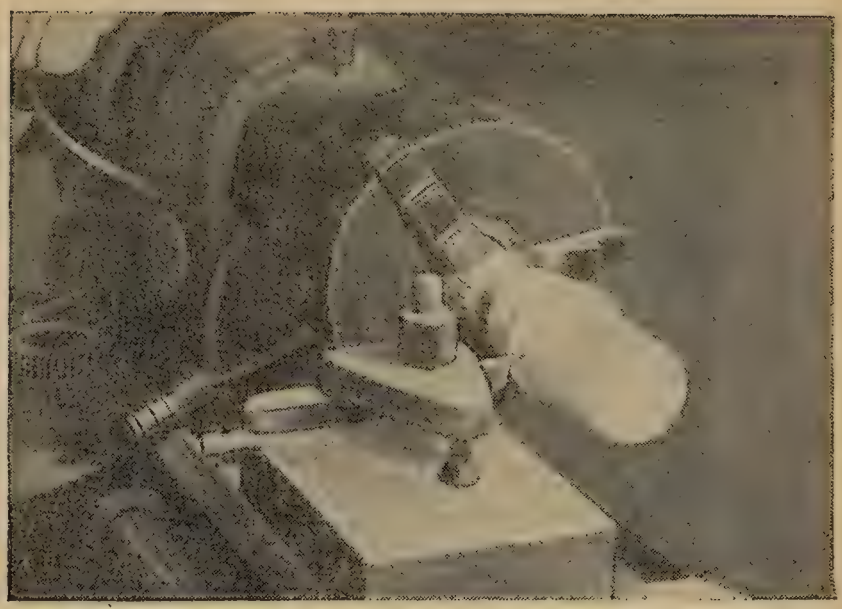


Рис. 136а. Обточка на токарном станке высоковольтного конденсатора.

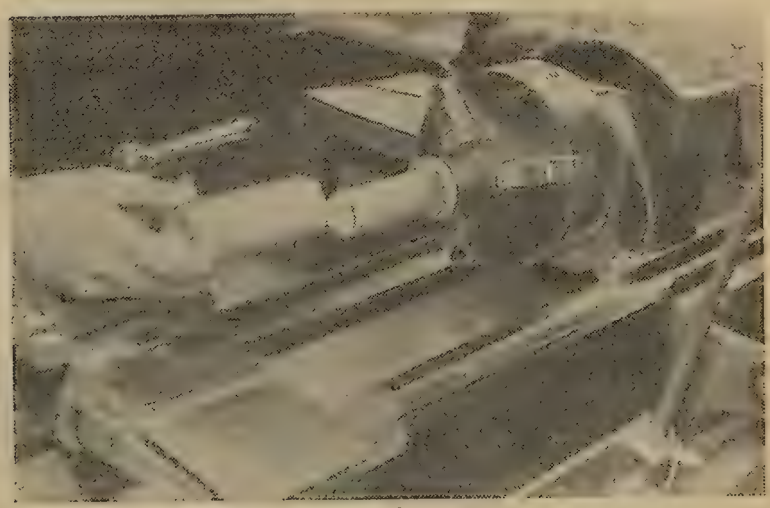


Рис. 136б. Обточка на токарном станке керамического каркаса

При обточке полой детали на токарном станке деталь одевают на твердую оправку (деревянную или другую), которую и зажимают в патрон станка.

При наличии на керамической детали прорезей или отверстий, расположенных по вертикали, необходимо отвести прорезь или верхнее отверстие относительно низа про-

Рис. 136в. Обточка керамического изолятора на токарном станке.

рези или нижнего отверстия на некоторое расстояние по направлению вращения формовочного станка. Это расстояние составляет приблизительно 5% от высоты прорези или от расстояния между отверстиями. Этим исключается возможность образования сдвига („винта").

§ 60. Изготовление изделий методом пластичной прессовки (штамповки)

При массовом изготовлении керамических установочных деталей малых размеров сложной конфигурации широко применяется метод оформления их путем пластичной прессовки (штамповки) на ударных прессах. Этот метод обеспечивает высокую производительность; стоимость изделий при этом удешевляется. Серьезным недостатком применения метода штамповки является повышенное и недостаточно постоянное значение усадки, а также часто наблюдаемая пористость изделий.

В принципе метод штамповки представляет собой пластичную прессовку (формовку) массы в металлической пресс-форме. Порошок массы в этом случае увлажняется до сос-

гояния текучести массы при давлении. В массу вводится небольшое количество органического вещества, связки, для лучшего отставания спрессованных изделий от стенок прессформы, а также для обеспечения более плотного прилегания отдельных частиц прессуемой массы друг к другу.

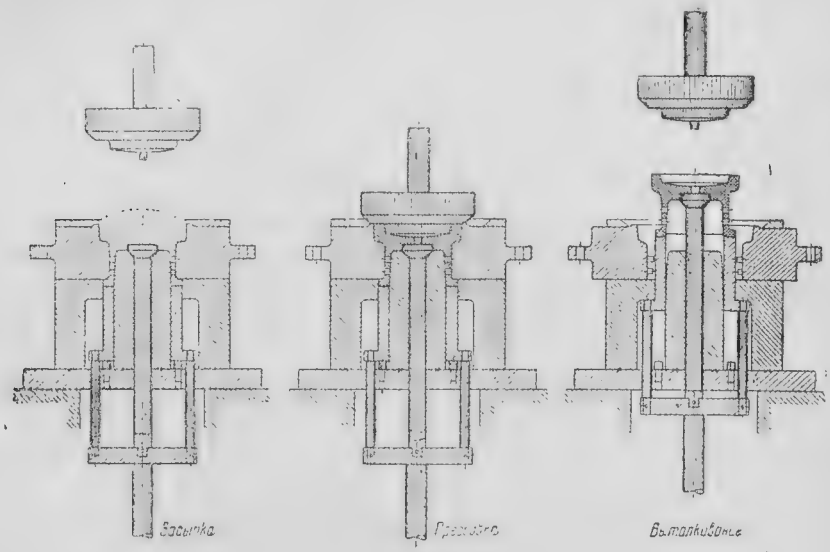


Рис. 137. Прессформа для штамповки (пластичной прессовки).

Штамповочный порошок изготовляется по следующей рецептуре:

массы сухой	75 — 77%,
воды	20 — 25%,
связки	4 — 5%.

В качестве связки берут смесь древесной смолы и керосина в соотношении 1 : 3, или деготь и керосин в соотношении 1 : 4. Смесь представляет собой маслянистую жидкость удельного веса 0,870 — 0,875. Увлажненный порошок засыпается в матрицу прессформы с избытком. Избыток массы при прессовке выжимается. Чертеж штампа для пластичной прессовки показан на рис. 137. Давление при штамповке невелико и необходимо лишь для придания формы пластичной массе.

Особенностью метода штамповки является то, что изделия из нормальных фарфоровых масс, изготовленные этим способом, после обжига отличаются пористостью. После увлажнения обожженных образцов диэлектрические потери в них заметно возрастают. Исследования показали, что при нормальном содержании влаги в штамповочном порошке вплоть до очень высоких температур спекание черепка не

обеспечивается. При очень большом количестве влаги в порошке изделие спекается нормально. Однако масса с избыточным содержанием влаги не может быть использована в производстве, т. к. изделие при выемке его из пресс-формы в этом случае легко деформируется. Плохое спекание черепка штампованных изделий при нормальной влажности порошка не связано с малым удельным давлением, т. к. при сухой прессовке даже при очень малых удельных давлениях при повышенных температурах спекание все же происходит.

Наиболее полное спекание штампованных изделий достигается тогда, когда в процессе обжига образуется маловязкая аморфная фаза, офлюсовывающая черепок.

§ 61. Изготовление изделий методом литья

Литье может быть рекомендовано только в специальных случаях, например, для изготовления крупных цилиндров или деталей сложной конфигурации, например, полых сферических роторов шаровых вариометров. Этот метод заключается в том, что жидкую керамическую массу (так называемый шликер) наливают в гипсовые формы, имеющие конфигурацию детали. Влага из шликера отсасывается стенками гипсовых форм и на них наращивается масса до необходимой толщины стенки. После выдержки в течение некоторого времени в гипсовой форме, изделие извлекается из нее, подвергается сушке, а затем обжигу. Влажность шликера при литье в зависимости от состава керамической массы составляет 35 — 40%.

Изделия, изготовленные методом литья, требуют дополнительную механическую обработку до обжига, причем достаточно высокая точность размеров литых изделий не обеспечивается ввиду значительной усадки материала при обжиге.

Метод литья эффективно используется для изготовления изделий из безглинистых масс. В последнее время разрабатываются новые методы литья, например, с применением электрофреза.

§ 62. Методы механической обработки керамических заготовок

Керамические заготовки, полученные каким-либо из рассмотренных способов, часто, как было указано, подвергаются индивидуальной механической обработке до обжига. На рис. 138 показана в качестве примера схема изготовления длинной гребенки катушки индуктивности. Тянутую прямоугольную заготовку пропитывают парафином и на фрезерном станке при помощи специального фреза обра-

батывают торцы (рис. 138а). Нарезка пазов производится также фрезом с одним зубом (резцом) с победитовым наконечником, ввиду того, что обычный фрез забивается массой и дает сколы. Далее деталь подвергается сверловке, цапфенборенью и шлифовке шкуркой на плите. На рис. 139 показан аналогичный процесс обработки колодки. На рисунках 140 и 141 представлены чертежи резцов и цапфенбора для обработки керамики до обжига.

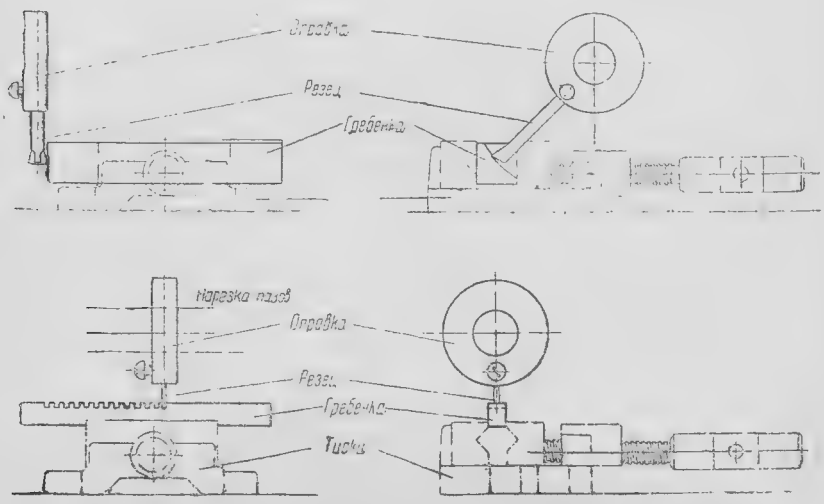


Рис. 138а и б. Обработка торцов на горизонтально-фрезерном станке.

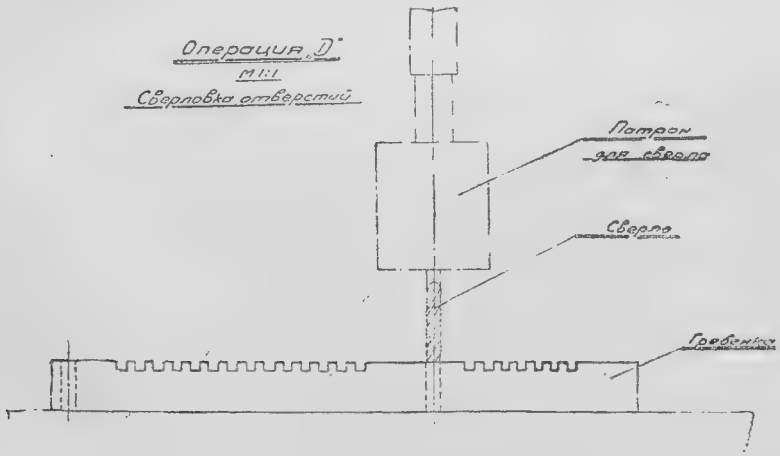


Рис. 138в. Сверловка отверстия.

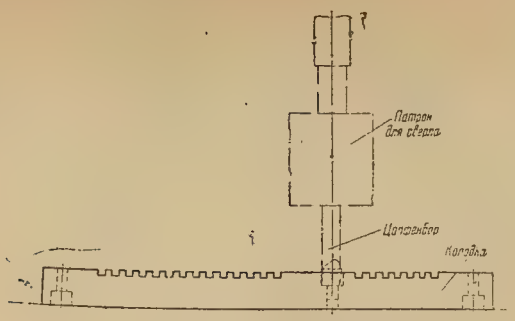


Рис. 138г. Цапфенборенье.

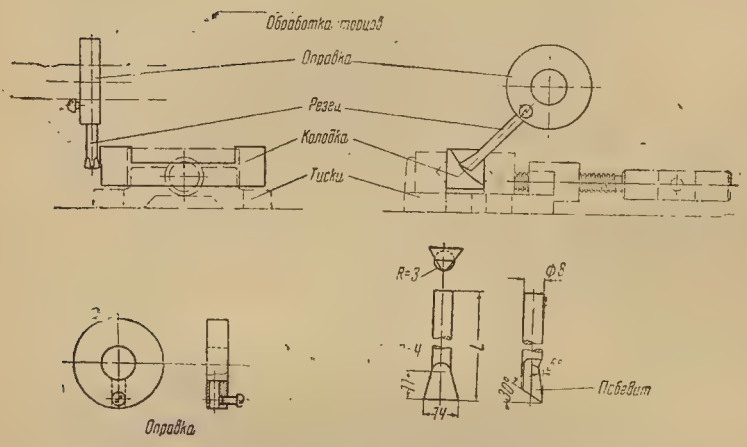


Рис. 139а. Резцы для фрезеровки на горизонтально-фрезерном станке.

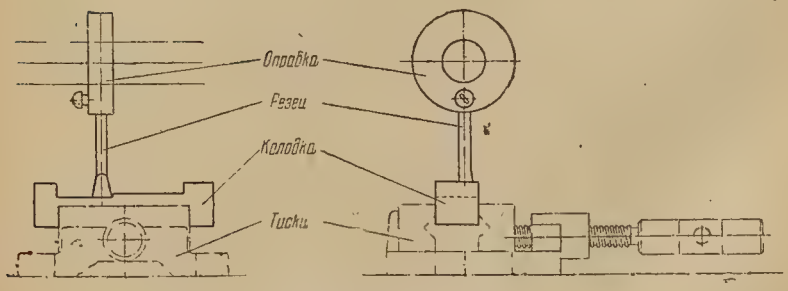


Рис. 139б. Фрезеровка паза.

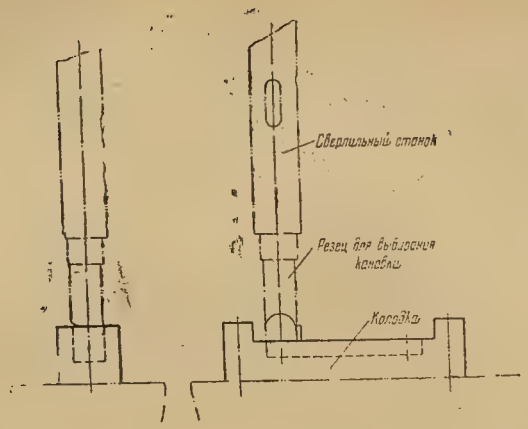


Рис. 139в. Фрезеровка колодки на горизонтально-фрезерном станке.

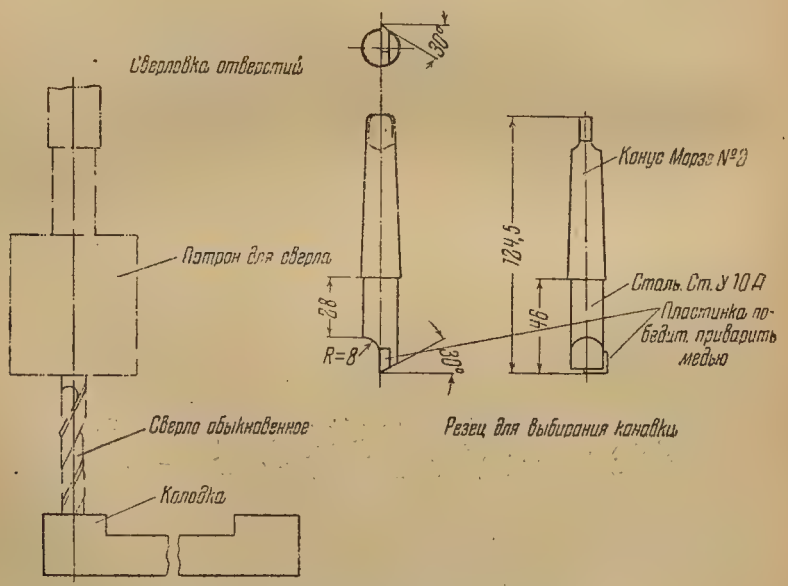


Рис. 139г. Сверло и фрезеровочные резцы.

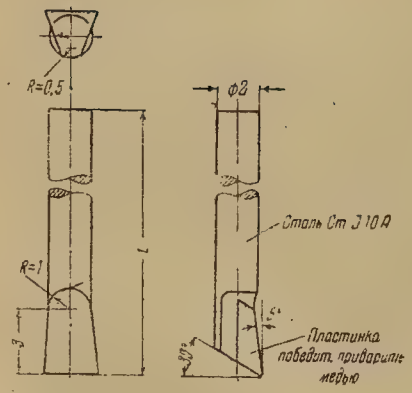


Рис. 140. Подрезной резец.

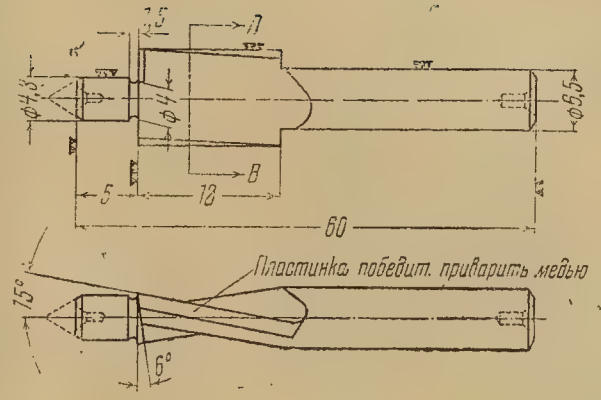
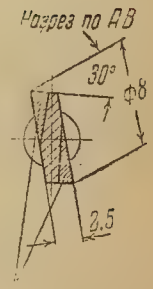


Рис. 141. Цапфенбор.



§ 63. Шлифовка обожженных керамических деталей

Керамические детали, которые должны строго соответствовать заданным размерам (оси конденсаторов, каркасы катушек, вариометры, платы и др.), подвергаются механической обработке (шлифовке) после обжига. В качестве абразивов применяются порошки карборунда, карбида бора, корунда, коракса, кварца, карборундовые и корундовые камни, а для сверловки отверстий—алмазные сверла.

Плоские детали шлифуют на вращающихся металлических дисках порошками разных номеров с увлажнением теми же приемами, которые приняты в оптике (рис. 142а).

Таким образом обрабатывают поверхность статора и ротора подстроечных конденсаторов, достигая при этом оптической точности пришлифовки, мачтоопорные изоляторы для обеспечения высокой прочности на сжатие и др.

Цилиндрические изделия шлифуются на станках при вращении детали на центрах, а также на бесцентровых шлифовальных станках (рис. 142б). Точность размера детали по диаметру может достигать $\pm 0{,}01$ *мм*.

Сложные детали, как например, шаровой вариометр, каркас катушки с резьбой, после обжига не только шлифуются, но и нарезаются с точным шагом для обеспечения нужной индуктивности. Отверстия малого диаметра в обожженных керамических деталях высверливаются алмазными сверлами, когда требуется очень большая точность расстояний между отверстиями. Этот способ, ввиду его сложности, применяется лишь в исключительных случаях.

§ 64. Обжиг керамических изделий

Для обжига керамических изделий применяются самые различные типы печей. На керамических заводах наибольшее распространение имеют печи периодического действия (горны) на нефти, газе, дровах или угле. Такие печи могут иметь рабочее пространство от 0,1 $м^3$ до нескольких сотен $м^3$. Максимальная температура таких печей с высококалорийным топливом при малых их размерах может быть получена до 1800°.

Значительно меньшим рабочим пространством, но более точным распределением температуры в соответствии с заданной кривой обжига, отличаются электрические печи: силитовые, криптоловые, вольфрамовые, небольшие лабораторного типа платиновые. Имеют применение также печи непрерывного действия—туннельные. В этом случае обеспечивается большая точность в распределении температуры.

Обжиг изделий производится в огнеупорных капселях. Продолжительность обжига и выдержка при максимальной

Рис. 142а. Шлифовка керамических деталей на плоских шайбах.

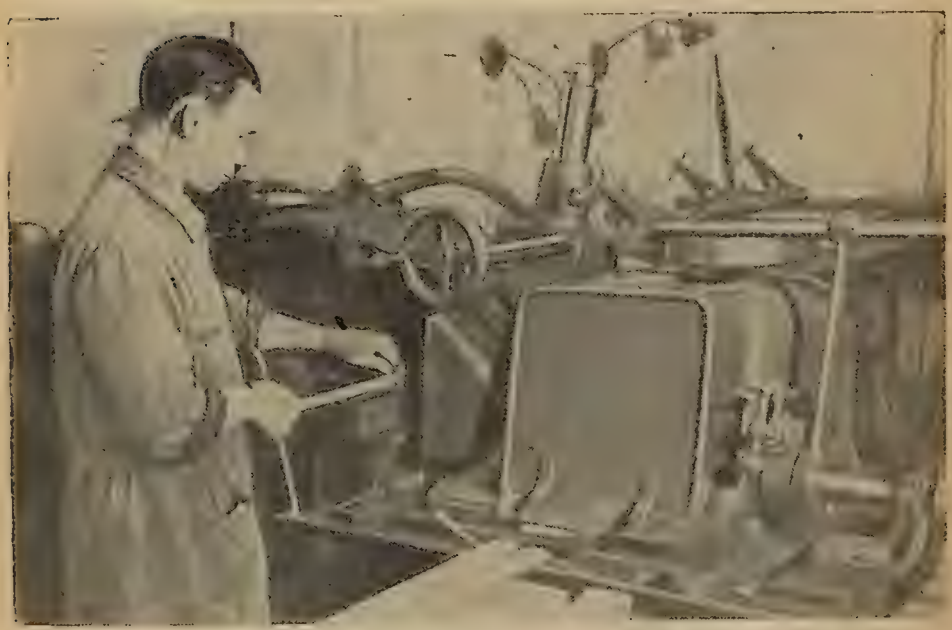


Рис. 142б. Шлифовка керамических осей на бесцентровом станке.

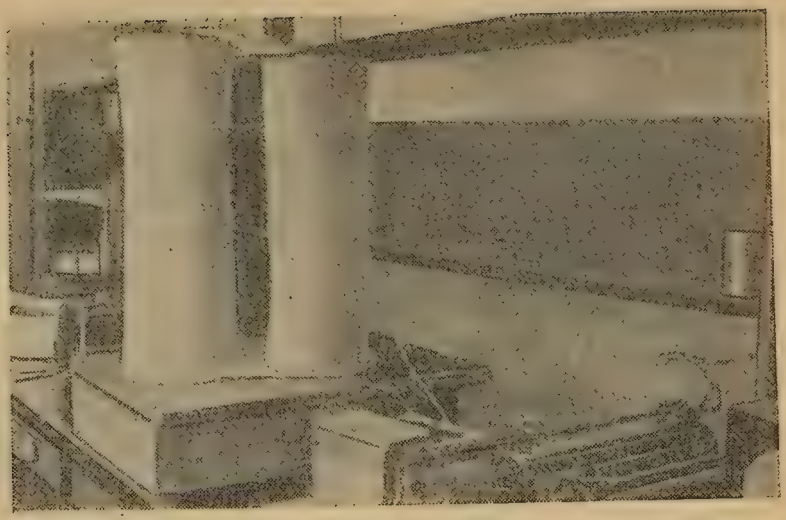


Рис. 142в. Сушка электрическим током керамических заготовок.

Рис. 142г. Загрузка в капсели керамических трубок для обжига в подвешенном состоянии.

температуре зависят от размера изделий и типа обжигательной печи. Общая длительность обжига в горнах 24—30 часов. В туннельных печах общая продолжительность об-

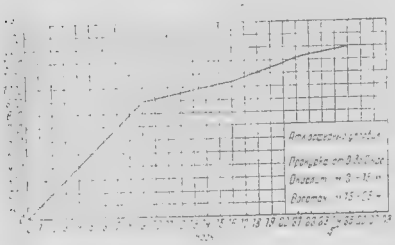


Рис. 142д. Режим обжига радиофарфора в горнах периодического действия.

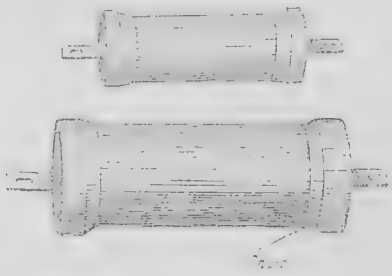


Рис. 143. Бумажные конденсаторы, герметично заделанные в керамический кожух.

жига (с остыванием) составляет от 2 до 6 суток. На рис. 142д представлен график обжига радиофарфора в горнах больших размеров.

Глава XIV

МЕТОДЫ КРЕПЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ АРМАТУРЫ НА КЕРАМИЧЕСКИХ ДЕТАЛЯХ

§ 65. Общие замечания

Прочное, надежное соединение керамики с металлическими частями делает керамическую изоляцию особенно ценной, еще больше расширяет область применения ее в электроаппаратуре.

Перед жестким, выдерживающим изменение температуры в широком интервале, соединением керамики с металлом теряются преимущества деталей из пластмасс с запрессованными в них металлическими частями.

Герметичное соединение металла и керамики открывает новые перспективы для различных конструкций (конденсаторов, сопротивлений и др.) и, в частности, позволяет капсулирование органических материалов с последующим применением их в условиях повышенной температуры или высокой влажности. На рис. 143 показаны бумажные конденсаторы, герметически заделанные в керамику.

Крепление металлической арматуры на керамике производится различными способами.

1. Механическим способом (болтами, вставленными в отверстия и укрепленными на шайбах и гайках, с помощью резьбы на керамике и металлических частях, посредством свинчивания этих частей, развальцовкой металлических

гнезд, шапок или колец на поверхности керамики, обкаткой металла).

2. С помощью заливочного состава, заполняющего углубления или выточки, обычно конического профиля, в теле керамического изолятора со вставленной металлической арматурой.

3. Посредством пайки металла и керамики после металлизации ее поверхности.

4. Соединением керамики с металлом при помощи стекла.

Герметичное соединение металла и керамики возможно только двумя последними способами.

§ 66. Механический способ крепления

Механический способ соединения керамики с металлическими частями является наиболее распространенным.

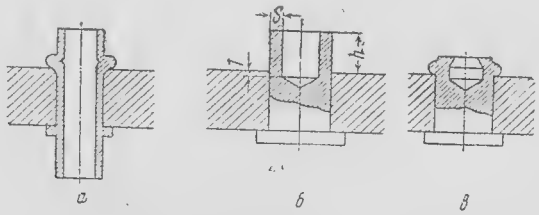


Рис. 144. Электротермический способ запрессовки металла в керамику:
а—запрессованная трубка;
б—заготовка до обжатия $\frac{s}{h} \cong \frac{1}{10}$; $s=0{,}4$; $h=4$;
в— букса после обжатия.

Как указывалось, применяется крепление с помощью болтов, развальцовки пистонов, обкатки колпачков и соединение при помощи резьбы. В последнее время получил применение так называемый электротермический механический метод крепления, заключающийся в том, что металлическая арматура разогревается током, находясь в керамике, и затем спрессовывается так, как показано на рис. 144; при охлаждении букса плотно обжимает керамику.

Таким способом возможна запрессовка в керамику медных, стальных, латунных и алюминиевых деталей. Керамика должна быть, конечно, механически прочной.

§ 67. Заделка металла в керамику с помощью цементов

Механически прочное соединение разнородных тел посредством промежуточного вещества возможно лишь в том случае, когда последнее или взаимодействует с поверхно-

стями соединяемых тел, или обладает адгезионными свойствами по отношению к скрепляемым телам, или увеличивается в объеме в процессе затвердевания. Исходя из признаков состава и свойств, можно следующим образом объединить цементирующие составы:

1. Собственно цементы[1] (гидравлические) — портланд-цемент, высокоглиноземистый цемент.

2. Неорганические мастики (воздушные)—цемент Сорреля, гипс, жидкое стекло с наполнителем, цинк-оксифосфат.

3. Замазки с органическими компонентами—глет-глицериновый цемент, бакелитовый лак с наполнителем, шеллак метилметакрилат с наполнителем, галовакс с полистиролом, карбинольный клей и др.

Большинство из указанных выше составов находит ограниченное применение или из-за малой теплостойкости, или из-за уменьшения в объеме (усадки) и малой механической прочности или, наоборот, из-за слишком большого увеличения в объеме (цемент Сорреля), вызывающего в ряде случаев растрескивание изделий, или, наконец, из-за корродирующего действия.

Практическое применение для монтажа радиодеталей получили гидравлические цементы, используемые главным образом для заделкм крупной арматуры, и глет-глицериновая замазка. Глет-глицериновая замазка получила применение при монтаже, в основном, мелких и средних деталей. Она представляет собой смесь хорошо просушенного тончайшего порошка свинцового глета с глицерином в соотношении 100 в. ч. глета и 10 в. ч. глицерина.

Приготовляется глет-глицериновая замазка небольшими порциями, так как схватывание наступает довольно быстро. Период затвердевания глет-глицериновой замазки равен примерно 48 часам; поэтому склеенная деталь в течение этого времени не должна подвергаться никаким механическим воздействиям. Наилучшие результаты по быстроте затвердевания и прочности, получаются при температуре 25—30° и относительной влажности 60—70%. При высокой влажности (в сырую погоду) схватывание и затвердевание очень замедляется. При 100—120° незатвердевшая окончательно замазка становится хрупкой. Необходимо отметить, что глет должен быть сухим; долго хранившийся на складе глет перед употреблением надо прогреть при температуре 200—250°. Рекомендуется употребление свежеприготовленного глета. Глет можно получить восстановлением при 450°—500°С смеси свинцового сурика с сажей (на 100 *г* сурика 1 *г* сажи).

Глет-глицериновая замазка проверена в производственном масштабе для соединения латунных, дюралюминиевых, сталь-

ных и медных деталей с радиофарфором. На рис. 145 показан типовой изолятор с применением глет-глицериновой замазки.

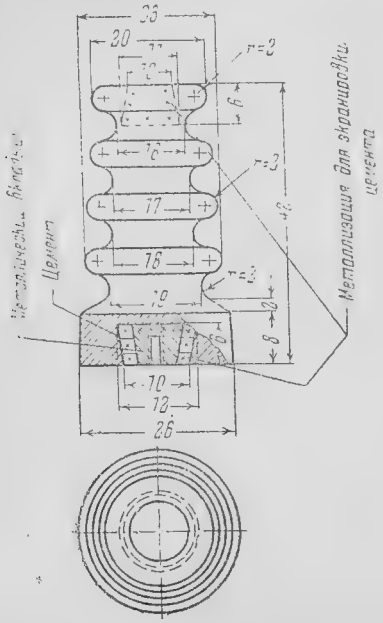


Рис. 145. Опорный изолятор с буксами, закрепленными на глет-глицерине.

Электрические свойства глет-глицеринового цемента невысоки. Угол диэлектрических потерь при радиочастотах составляет 200 — 250 минут. При малых толщинах цемента по сравнению с керамикой заметного ухудшения электрических свойств всей детали не наблюдается ввиду малого напряжения, падающего на цемент. При больших толщинах цемента по сравнению с керамикой электрические свойства деталей заметно ухудшаются. Для исключения из электрического поля цемента его можно экранировать. Наиболее просто экранировка может быть осуществлена путем металлизации соответствующей части керамики и электрического соединения металлического слоя с заделанной металлической деталью, как это показано на рис. 145.

§ 68. Вакуумноплотное соединение керамики с металлом методом пайки

Герметичное соединение керамики с металлом осуществляется путем мягкой или твердой пайки металлизированной поверхности керамики и металла или при помощи промежуточного слоя стекла, сплавляющегося с соединяемыми керамикой и металлом.

Металлизация керамики производится нанесением на ее поверхность слоя благородного металла (золота, платины, серебра) для осуществления мягкой пайки или металлов группы железа (железа, никеля, кобальта) для осуществления твердой пайки. Металлизация керамики шоопированием не обеспечивает герметичности, так как слой очень легко отстает от керамики. Нанесение металла методом вакуумного испарения требует, с одной стороны, сложного оборудования,

а, с другой—не обеспечивает достаточно толстого, прочного слоя, необходимого для пайки. Поэтому метод металлизации керамики путем горячего вжигания в настоящее время является единственным технически приемлемым.

Из группы благородных металлов основное применение имеет серебро. Нанесение серебра на поверхность керамики производится хорошо известными способами горячего вжигания металла в керамику. Для этой цели применяются различные по составу пасты, состоящие из связки (сгущенного скипидара, раствора канифоли в скипидаре и других), молекулярного серебра, или легко разлагающегося при повышенной температуре углекислого серебра, или смеси азотнокислого серебра и углекислого аммония с добавкой того или иного плавня (буры, окиси висмута и др.). Сгущенный скипидар готовится медленным испарением очищенного скипидара при температуре 30—40°. Молекулярное серебро готовится восстановлением при помощи водорода (кислота и гранулированный цинк) из раствора азотнокислого серебра. Углекислое серебро может быть приготовлено по реакции между какой-либо углекислой солью (углекислый аммоний, сода) и азотнокислым серебром, получаемым растворением серебра в азотной кислоте. Тщательно приготовленная паста кисточкой или с помощью пульверизатора наносится на керамическую поверхность, высушивается на воздухе, а затем в сушильном шкафу и вжигается при температуре 650—800°.

Мелкие тонкостенные детали можно сразу вносить в горячую печь, крупные детали из-за возможного растрескивания вследствие термического удара следует нагревать и охлаждать медленно.

Операцию нанесения пасты и обжига для получения равномерного слоя необходимо выполнять два раза.

На рис. 146—149 показаны приспособления для серебрения трубчатых конденсаторов, нанесение обмотки на керамический каркас и припайка выводов к конденсаторам.

Толщина металлического слоя на керамике не должна превышать 10—20μ. Хорошо нанесенный слой прочно связан с керамикой; для отрывания его требуется усилие порядка 50 *кг/см*^{2}. Часто при попытке отрывания слоя вырывается часть тела керамики.

Слой металла, нанесенный вжиганием, несколько пористый и не обладает полной объемной проводимостью. Для усиления его в случае необходимости производится дополнительная металлизация (серебрение, меднение) гальваническим путем; толщина слоя металла гальванического покрытия не должна превышать 20μ, во избежание отставания металлического слоя при местных перегревах.

Рис. 146. Нанесение серебряной обмотки на керамический каркас.

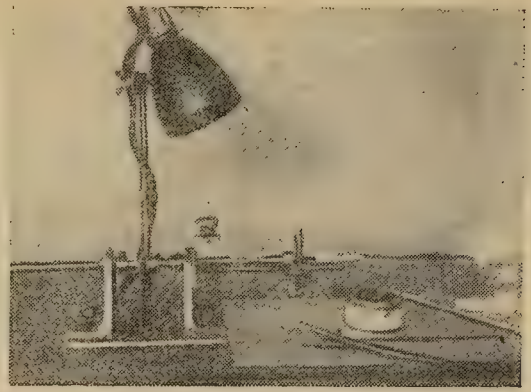


Рис. 147. Серебрение трубчатых конденсаторов.

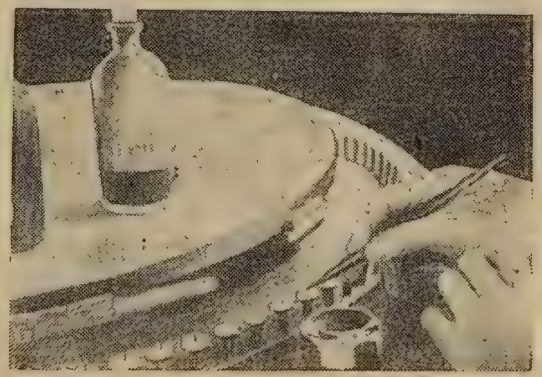


Рис. 148. Припайка выводов к шайбным конденсаторам на вращающемся столе.

Рис. 149. Припайка выводов к дисковым конденсаторам.

Для обезжиривания покрытий перед гальванизацией применяются вещества, не разъедающие очень тонкий металлический слой, например, трихлорэтилен, венская известь.

На рис. 150 показан герметичный ввод для конденсаторов с применением мягкой пайки.

Для деталей, работающих в условиях высоких температур, применяется твердая пайка. При твердой пайке керамику покрывают металлами, которые при последующем паянии почти не растворяются, или растворяются очень мало в расплавленном припое. К таким металлам относятся трудно растворимые при паянии серебром: железо, никель и кобальт. Лучшие результаты достигнуты с железом. Металл в виде пасты из тонкодисперсного порошка и связующего наносится на поверхность керамики и вжигается при температуре 1300 — 1400° в нейтральной атмосфере. Под понятием „вжигание" подразумевается весьма сложный процесс, состоящий частично из взаимного спекания металлических частичек и частично из взаимодействия их с поверхностным слоем керамики. Таким образом происходит постепенный переход от чистой керамики к чисто металлическому слою через промежуточный смешанный металлокерамический слой. Приготовление пасты для металлизации производится путем тщательного смешения тонкодисперсного металлического порошка с величиной зерна в 1,5—2 μ со спиртовым раствором шеллака или с 10% раствором коллодия до образования вязкой массы. Полученная паста наносится кистью на поверхность керамики равномерным слоем, толщиной 0,03—0,04 *мм*.

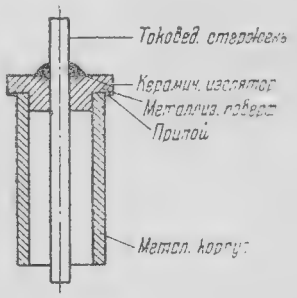


Рис. 150. Металлизированный керамический изолятор для малогабаритного цилиндрического конденсатора.

Покрытие тел вращения производится на механических станках. Хорошее покрытие возможно при некотором навыке. Покрытые пастой изделия высушиваются в комнатных условиях или термостате, а затем подвергаются обжигу в вакуумной печи или в печи с нейтральным газом. Скорость подъема температуры в печи определяется размерами детали. Для мелких деталей максимальная температура достигается спустя один час. По окончании обжига на поверхности керамики образуется прочный металлический слой, допускающий мягкую и твердую пайки.

Для металлизации керамики, по литературным данным, смесь молибденовой и железной пудры в растворе колодия наносят на образец кистью равномерным слоем. После этого

образцы обжигают в печи при температуре в 1330—1340° в атмосфере формиргаза (50 литров азота и 200 литров водорода).

Сверху молибденового слоя наносится слой никелевой пасты с последующим вторичным обжигом изделий при 980° в атмосфере водорода.

Пайка металлизированной керамики с металлическими деталями производится, в основном, аналогично пайке металлических изделий. В качестве паяльной жидкости при пайке серебра применяют смесь, состоящую из 84,5% спирта, 10% глицерина, 5% пропионовой или уксусной кислоты и 0,5% соляной кислоты. При пайке меди употребляется смесь, состоящая из 16% хлористого цинка, 16% нашатыря и 68% глицерина или 10% соляной кислоты, 20% глицерина и 70% воды.

Указанные паяльные жидкости применяются только в том случае, когда детали допускают после пайки тщательную промывку водой. В противном случае следует использовать спиртовой раствор канифоли.

В качестве припоя употребляются чистые металлы: олово (температура плавления 230°), кадмий (температура плавления 320°), а также сплавы этих металлов, например, сплав олова 47%, кадмия 17% и свинца 36% (с температурой плавления 142°).

При пайке керамики, покрытой благородными металлами, следует проявлять осторожность, так как они легко растворяются в расплавленном олове и такая пленка металла после окончания пайки может в отдельных местах полностью отсутствовать. В процессе паяния следует полудить не слишком горячим паяльником металлизированную поверхность керамики, а затем припаивать к ней металлическую деталь.

Пайка твердыми припоями производится обычно в электрической печи. Местный нагрев керамики (газовой горелкой, паяльной лампой) недопустим. В отличие от твердой пайки металлических деталей при вакуумноплотной пайке керамики с металлом не применяются флюсы, бура, стеклянный порошок и др. Стекловидная масса флюсов попадает в шов, что ведет к образованию неплотного спая. Пайка поэтому производится без добавок в восстановительной атмосфере. В качестве припоя употребляется серебро, медь и их сплавы. Припой применяется в виде проволочных колец, пластинок или стружки и помещается около самого места спая. Спаиваемые детали при этом должны быть скреплены вспомогательными приспособлениями так же, как это делается при твердой пайке металлических изделий.

На рис. 151 показано устройство электрической печи, применяемой при твердой пайке мелких керамических дета-

лей. Спаиваемые детали помещаются в горячую зону печи; охлаждение изделия после пайки производится в холодной зоне. При массовом производстве в последнее время применяют конвейерные печи с нейтральной атмосферой. В этих печах керамические детали медленно нагреваются и после перехода из горячей зоны также медленно охлаждаются, что исключает возникновение термических напряжений. При соединении металла и керамики путем горячей пайки требуется специальная конструкция места спая, ввиду резко

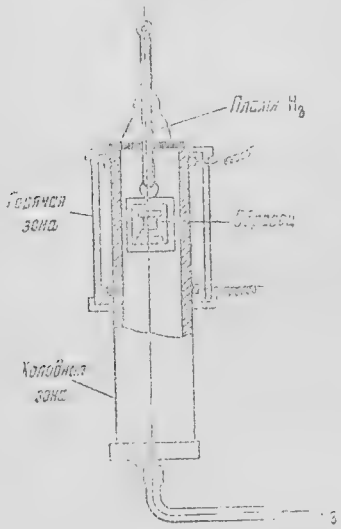


Рис. 151. Электрическая печь для пайки керамических деталей твердыми припоями

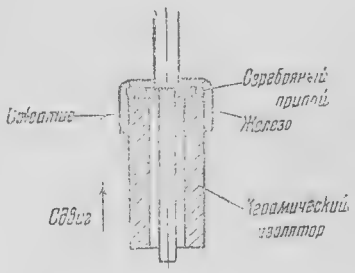


Рис. 152. Изолятор с твердой пайкой

различных физических и механических свойств (коэфициентов расширения, теплопроводности, механической прочности, эластичности) керамики и металла. В таблице 15 приведены значения коэфициентов линейного расширения некоторых материалов.

Ввиду высокой механической прочности керамики при сжатии и малой при растяжении, необходимо конструировать металлокерамические сочленения так, чтобы керамика по возможности не испытывала растягивающих усилий. На рис. 152 показана употребительная конструкция изделия с вакуумноплотным соединением керамики с металлом, осуществленным пайкой твердым припоем. При пайке мягкими припоями возможно соединение керамики с металлами, характеризующимися повышенными коэфициентами расширения (железом, медью), так как возникающие в припое напряже-

Таблица 15

Коэфициенты линейного расширения керамики и металлов

Название материала	$\alpha \cdot 10^{-6}$ в пределах 20—100
1. Керамика	
радиофарфор	3,8
радиостеатит	7,7
ультрафарфор	4,5
алюминоксид	6,0
2. Металлы и сплавы	
вольфрам	4,5
молибден	5,2
никель	13,0
железо	12,5
серебро	19,5
медь	16,5
инвар (железо, никель)	1,1
ковар (никель, железо, кобальт)	5,3

ния частично сглаживаются благодаря собственной пластической деформации.

Для вакуумноплотного соединения керамики с металлом при помощи твердой пайки рекомендуется применение металлических сплавов с пониженным коэфициентом расширения, в частности, железоникелевых. При твердой пайке керамики обращают особенное внимание на конструкцию места соединения, имея в виду указанные выше особенности керамики сравнительно с металлом. Слой припоя должен быть тонким во избежание термических напряжений. На рис. 153 представлена деталь металлокерамической лампы с концентрическими вводами. В этом случае впаиваемыми металлами служат сплавы железа и никеля. Внутренний электрод обычно изготовляется из сплава с коэфициентом расширения меньшим, чем у керамики, внешний—с большим. Таким образом обеспечивается сжатие керамики. Толщина

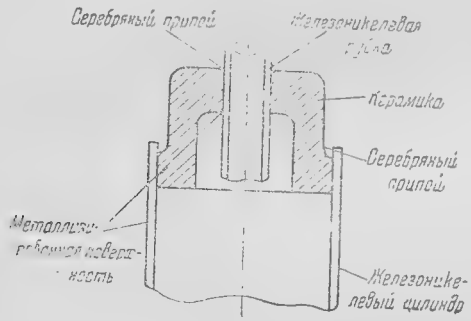


Рис. 153. Деталь металлокерамической лампы.

металла у места спая 0,25 *мм*. Допускается также применение одного сплава для изготовления внутреннего и внешнего вводов. В этом случае толщина металла у места спая составляет всего 0,12 *мм*. При малых диаметрах вводов допустима замена железоникелевых сплавов чистым железом. Для лучшего спаивания и лучшей электропроводности железоникелевые детали перед пайкой покрываются серебром. Вакуумноплотное соединение возможно также в случае двух металлизированных керамических деталей. Слой припоя используется здесь в качестве вывода.

§ 69. Соединение керамики с металлом посредством стекла

В качестве соединяемых металлов обычно употребляются ковар (железо 52,3%, никель 29,7%, кобальт 18%) и молиб-

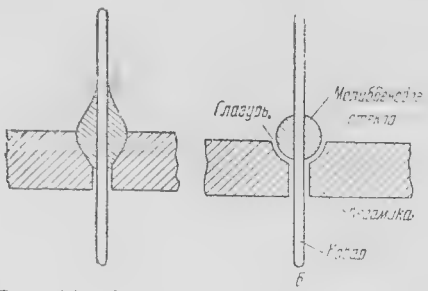


Рис. 154. Соединение металла с керамикой посредством стекла.

ден. Коэфициенты расширения ковара и молибдена близки по значению. Керамика применяется механически прочная. При этом способе большей частью производится соединение проволоки с керамической пластинкой.

Проволока из ковара оплавляется вручную на пламени газовой горелки молибденовым стеклом так, что на ней образуется стеклянная бусинка. После этого проволочка вставляется в отверстие нужной формы керамической пластинки, как показано на рис. 154, вместе с ней помещается в электрическую печь и нагревается медленно до 850—900°. При этом стеклянная бусинка сплавляется с керамикой. Поверхность керамики в месте спая предварительно покрывается глазурью.

Одновременно возможно сплавление с керамикой нескольких проволочек. Соединение молибденовой проволоки с керамикой производится аналогично, с той лишь разницей, что сплавление производится в атмосфере формиргаза во избежание окисления.

Соединение керамики с металлическими деталями крупных размеров посредством стекла не получило широкого

распространения ввиду большой сложности процесса. Однако, в этом случае возможны соединения с керамикой металлов с большим коэфициентом расширения, например, меди.

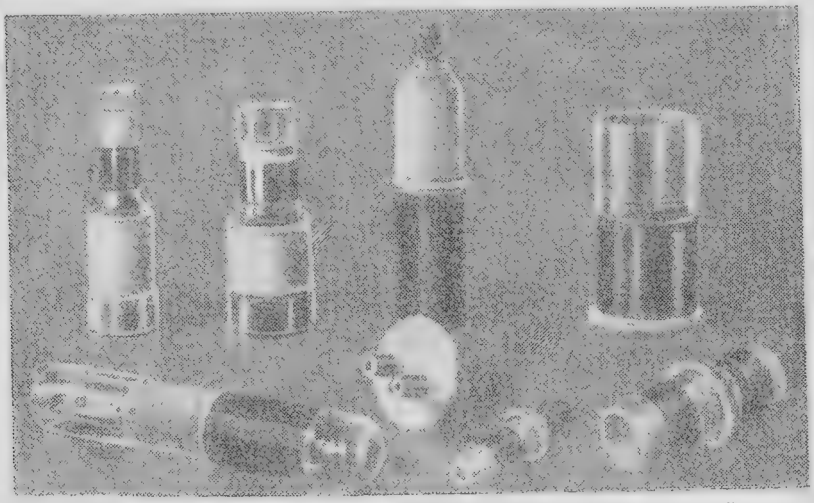


Рис. 155. Детали со стеклянно-керамической изоляцией.

На рис. 155 показаны электронные лампы со стеклянно-керамическими корпусами.

Глава XV

НЕОРГАНИЧЕСКИЕ СТЕКЛА

§ 70. Общая характеристика

Использование стекла в электротехнике тесно связано с особенностями его технологии, допускающей неограниченную массовость выпуска однотипных деталей и базирующейся на недефицитном сырье. При изготовлении изделий из стекла используется его способность становиться пластичным в нагретом состоянии, что позволяет применять для оформления изделий метод выдувания (например, для производства ламповых баллонов), горячую прессовку вязкой массы стекла в металлических подогретых прессформах, отливку заготовок, протяжку через мундштук (листовое стекло, изготовляемое на машинах Фурко). Часто эти методы изготовления изделий не обеспечивают нужной точности размеров и тогда возникает необходимость дополнительной обработки деталей—шлифовки, просверливания отверстий, распиловки. Однако механическая обработка стекла сложна ввиду большой твердости и хрупкости его.

Соответственно потребностям электропромышленности, технические стекла разделяются на следующие группы.

I. Ламповые стекла. Эти стекла используются для баллонов осветительных и электронных ламп и в качестве внутриламповой изоляции.

II. Конденсаторные стекла. Стекла этой группы служат диэлектриком конденсаторов постоянной емкости, применяемых в высоковольтных фильтрах, в импульсных генераторах, а также в контурных цепях высокочастотных генераторов.

III. Установочные стекла. Такие стекла служат для изготовления установочных деталей, телеграфных, антенных изоляторов, опорных и проходных изоляторов, бус, плат воздушных образцовых конденсаторов, окон и плат измерительных приборов.

IV. Эмали. Эта группа стеклообразных диэлектриков предназначается для поверхностных покрытий и для цементации различных изделий.

Особое место среди изделий из стекла занимает стеклянная пряжа, появившаяся в промышленности в последние годы. Этот вид изоляции заменяет асбестовое волокно, имея преимущество по механической прочности и электрическим свойствам. Стеклянная пряжа находит применение в технике сильных токов для изоляции электрических машин и в радиотехнике, например, в качестве основы для проволочных сопротивлений.

Ламповые стекла особенно дешевы. Выплавка их производится при обычной для стекольной техники температуре 1300—1350°. Основное требование, предъявляемое к ним,— определенный коэфициент теплового расширения в связи с сопряжением с металлом, вольфрамом, молибденом и др. Электрические свойства их обычно относительно невысокие.

Положительной особенностью конденсаторов из стекла является высокое значение электрической прочности.

Высокочастотные конденсаторные стекла должны отличаться особенно малыми диэлектрическими потерями.

Установочные стекла имеют высокую термическую и химическую стойкость. Электрические свойства этих стекол должны быть хорошие. Малые диэлектрические потери конденсаторных и установочных стекол обеспечиваются введением в их состав тяжелых окислов.

Группу эмалей составляет большое число боратных, щелочных, фтористых стекол, прозрачных, окрашенных, а иногда содержащих выкристаллизовавшиеся соединения. Составы эмалей устанавливаются прежде всего из условий низкой температуры стеклообразования. Это требование вытекает из необходимости наносить эмали на изделия, изготовленные из металлов—железа, меди, нихрома. Выбор эмали в большинстве случаев определяется не ее электрическими свойствами, а соображениями о коэфициенте рас-

ширения основы, требованиями к механической прочности слоя, термической стойкости, влагостойкости.

Стеклообразующие окислы SiO_2 или B_2O_3 являются обязательными составными частями практических стекол. Борный ангидрид B_2O_3 используется в стекловарении значительно реже, чем кремнезем SiO_2. Одновалентные основные окислы Na_2O, K_2O выполняют роль плавней, сильно снижая температуру плавления стекла. Высокое содержание этих окислов в стекле так же, как и двухвалентных окислов CaO, BaO, ZnO, приводит к кристаллизации (заруханию) стекла.

Силикатно-щелочные стекла, не содержащие щелочноземельных двухвалентных окислов, легкоплавки, но растворимы в воде. Применение этих стекол очень ограничено. К этой группе относится так называемое жидкое стекло. Двухвалентные окислы служат для повышения химической стойкости и входят в состав практических стекол как обязательная компонента.

§ 71. Физические и механические свойства стекол

Свойства стекла определяются как химическим составом, так и термической обработкой стекла. Стекло одного и того же состава в закаленном и отожженном состоянии обнаруживает различие по электрическим и физико-механическим свойствам. Примером закаленного стекла может служить стекло „секурит", отличающееся аномально-высокой механической прочностью. Лист секурита толщиной 7—8 *мм* не разбивается при свободном падении на него шара, весом 0,5 *кг* с высоты 1,5 *м*.

Нормально стекло является очень хрупким материалом. Предел упругости стекла близок к разрушающему усилию. Прочность стекол на сжатие во много раз выше, чем на разрыв. Временное сопротивление на разрыв для стекол лежит в пределах от 100 до 300 $кг/см^2$. На сжатие—от 600 до 20 000 $кг/см^2$ (для кварцевого стекла). Значение модуля упругости колеблется в пределах $5.10^5 — 1.10^6 кг/см^2$. Твердость стекла по Моосу составляет 5—6.

Плотность стекол колеблется в широких пределах от 2,2 (кварцевое стекло) до 6,3 $г/см^3$ в зависимости от содержания в них тяжелых окислов.

Теплоемкость стекла между 15° и 100° для разных сортов стекла колеблется в пределах от 0,08 до 0,25 $\frac{кал}{г°C}$. Теплопроводность стекла очень мала. При комнатных температурах значения теплопроводности лежат в пределах от 0,0016 до 0,0033 $\frac{кал}{см\ сек\ °C}$.

Коэфициент термического расширения имеет для стекол очень большое практическое значение. При впайке металлов в стекло, эмалировании металлов, спайке разных стекол и т. п. прочное соединение может быть достигнуто только при близких коэфициентах расширения составляющих. В противном случае образуются трещины. До температуры T_g коэфициент расширения от температуры почти не зависит. В этом интервале температур, в зависимости от состава стекла, коэфициент линейного расширения колеблется от $5 \cdot 10^{-7}$ (кварцевое стекло) до $110 \cdot 10^{-7}$.

Важным свойством стекла является термическая стойкость, т. е. способность стекла сопротивляться резким изменениям температуры. Стекло лучше выдерживает быстрый подъем температуры, чем быстрое падение ее. Термическая стойкость стекла определяется его коэфициентом расширения, температуропроводностью и механическими свойствами. Шотт дает следующую формулу для термостойкости:

$$F = \frac{p}{\alpha E}\sqrt{K_t} = \frac{p}{\alpha E}\sqrt{\frac{k}{c \cdot \gamma}}, \qquad (80)$$

где: F—коэфициент термостойкости;
p—временное сопротивление разрыву;
α—коэфициент термического расширения;
E—модуль упругости;
K_t—коэфициент температуропроводности,
c—теплоемкость,
γ—плотность;
k—коэфициент теплопроводности.

Чем выше величина F, тем более термостойко стекло.

§ 72. Электрические свойства стекол

Пробивная напряженность стекол (при электрическом пробое) мало зависит от их состава: на пробивное напряжение стекла влияют воздушные включения (пузыри) в толще материала. В однородном электрическом поле пробивная напряженность стекла достигает очень высоких значений, до $5.10^6 \frac{в}{см}$. В неоднородном поле пробой стекла наступает при значительно более низких средних напряженностях из-за краевых явлений; порядок величины пробивных напряжений был приведен ранее. При высоких частотах разрушение стекла под действием напряжения носит, как и для большинства других материалов, термический характер. Допустимое напряжение определяется температурной зависимостью угла потерь, термостойкостью изделия, теплоотдачей и т. д.

Влияние состава стекла на диэлектрические потери в со-

ответствии с данными ранее закономерностями сводится к следующему:

1. Наличие в силикатных стеклах окислов Na_2O при отсутствии или при малом содержании в стекле K_2O, или окислов тяжелых металлов,— вызывает катастрофическое возрастание угла диэлектрических потерь. Диэлектрические потери таких стекол резко возрастают, начиная с температур, близких к комнатным.

2. Частичная замена окислов Na_2O окислами K_2O снижает диэлектрические потери в стеклах; возрастание угла диэлектрических потерь происходит при более высоких температурах.

3. Полная замена Na_2O в силикатных стеклах окислами K_2O также снижает диэлектрические потери. Пересчет из весовых процентов в атомные не оправдывается при этом. Возрастание угла диэлектрических потерь начинается при значительно более высоких температурах.

4. Стекла, не содержащие щелочных окислов, имеют малые диэлектрические потери, возрастающие лишь при высоких температурах.

5. Стекла, содержащие тяжелые окислы в больших количествах, отличаются низкими диэлектрическими потерями как при нормальных, так и при высоких температурах даже при наличии в них щелочных окислов. Потери этих стекол близки к значению потерь бесщелочных стекол.

6. Все технические стекла имеют диэлектрические потери, значительно превосходящие (в 5—10 раз и более) потери плавленого кварца.

Таким образом в зависимости от электрических свойств все силикатные стекла можно разделить на три основные группы:

I. Щелочные стекла без тяжелых окислов или с незначительным содержанием их. Эта группа распадается на две подгруппы:

а) стекла с окислами натрия без окислов калия;

б) стекла с окислами калия или с калиевонатровыми окислами.

В эту группу входит большинство нормальных стекол (оконное, бутылочное, зеркальное и др.), из электротехнических—пирекс.

II. Щелочные стекла с высоким содержанием тяжелых окислов. В эту группу входят флинты (силикатно-свинцовые стекла) и баритовые кроны.

III. Бесщелочные стекла.

Эту группу составляют некоторые оптические стекла и специальные стекла.

Составы технических стекол соответственно указанной классификации приведены в таблицах 16, 17, 18. В таблицах 19, 20 и 21 приведены электрические и физические свой-

Составы стекол первой группы

Таблица 16

№№ п/п.	Подгруппа	Обозначение стекла	Состав (по весу), в процентах										
			SiO_2	B_2O_3	Na_2O	K_2O	CaO	BaO	PbO	MgO	ZnO	Al_2O_3	As_2O_3
1	1. Стекла, содержащие натровые окислы, без калиевых	46 – с	68,0	16,5	6,2			—	—	—	4,9	1,1	0,2
2		Пирекс норм.	80,5	12,0	4,5	—	—	—	—	0,5	—	2,0	0,5
3		65	68,4	5,17	14,48		—	1,55	5,54	—	2,17	2,49	0,2
4		49	66,7	-	15,2	—	—	-	13,0	—	4,9	—	0,2
5	2. Стекла, содержащие калиевые окислы или калиево-натровые	7	71,0	—	—	18,6	10,1	—	—	—	—	—	0,3
6		Пирекс калиев.	80,5	13,0		5,5	—	—	—	0,5	—	—	0,5
7		Пирекс калиево-натр.	80,5	12,0	3,0	3,5	—	—	—	0,5	—	—	0,5
8		12	66,3	1,0	7,8	13,7	5,8	—	—	—	3,8	1,5	0,2
9		20	72,0	8,1	7,2	10,4	1,5	—	—	0,4		—	0,2
10		707	70,0	25,3	2,3	0,2	0,1	—	—	0,1	-	1,6	0,1
11		23	68,4	2,7	9,4	7,1	8,5	—	—	—	-	3,9	—
12		41	72,2	16,5	4,3	0,1	—	-	6,3	—	—	0,5	—
13		11	68,9	11,0	10,4	6,5	—	2,9	—	—	—	—	0,1
14		16	70,4	—	10,6	4,8	—	3,8	10,3	—	—	—	—
15		2	57,2	0,2	-	12,6	—	11,1	9,8	—	4,7	—	0,1

Составы стекол второй группы

Таблица 17

№№ п/п.	Обозначение стекла	Состав (по весу), в процентах										
		SiO_2	B_2O_3	Na_2O	K_2O	BaO	PbO	Cb_2D_2	TiO_2	ZnO	Al_2O_3	As_2O_3
1	28	60,9	—	4,6	8,1	—	26,2	—	—	—	—	0,2
2	Минос	44,7	0,5	10,2		—	41,9	—	—	—	0,3	—
3	11	41,4	—	—	5,4	—	53,1	—	—	—	—	0,1
4	16-Л	53,0	1,5	—	9,8	—	36,5	—	—	—	—	0,2
5	47	54,3	1,5	3,0	8,0	—	33,0	—	—	—	—	0,2
6	23-Л	29,0	—	3,0	—	—	68,0	—	—	—	—	0,2
7	15	42,4	—	1,0	7,4	10,7	33,2	—	—	5,1	—	0,2
8	13	49,6	4,8	1,3	7,6	21,6	2,6			12,5		0,2
9	22	51,3	3,0	1,3	7,8	20,5	3,0	—	—	13,0	—	0,2
10	30	49,3	8,6	—	6,5	33,5	—	—	—	—	2,0	0,1
11	17	59,4	3,7	2,9	9,9	20,4	—	0,7	—	3,5	—	0,2
12	Титановое	14,4	12,5	2,0	—	44,0	—	—	24,0	—	3,0	—

Таблица 18

Составы стекол третьей группы

№№ по пор.	Обозначение стекла	Состав (по весу), в процентах					
		SiO_2	B_2O_3	BaO	Al_2O_3	ZnO	As_2O_3
1	24	31,8	12,9	48,0	3,0	2,8	1,5
2	19	37,2	14,8	41,6	5,0	—	1,5
3	Боратное	—	69,0	12,0	18,0	—	1,0

ства этих стекол. Температурная зависимость угла диэлектрических потерь для щелочных стекол показана на рис. 156 и 157, для бесщелочных стекол — на рис. 158. Из рис. 156

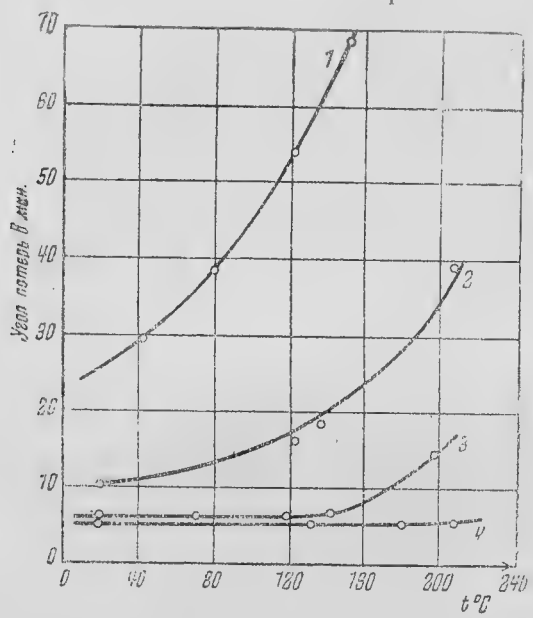


Рис. 156. Зависимость угла диэлектрических потерь от температуры стекол с натровыми, натровокалиевыми и калиевыми окислами при $\lambda = 300$ *м*.
1—стекло 65; 2—пирекс натровый нормальный; 3—пирекс натровокалиевый; 4—пирекс калиевый.

видно, как резко меняется величина угла потерь и характер изменения его с температурой при частичной и полной замене окислов натрия окислами калия. На рис. 157 показано влияние тяжелых окислов на диэлектрические потери щелочных стекол.

Таблица 19

Электрические и физические свойства стекол первой группы

№№ п/п.	Подгруппа	Обозначение стекла	Угол потерь в мин. при f=1.10⁶ гц		Диэлектрическая проницаемость ε	Удельное объемное сопротив. t ~ 200° в Ω · см	Коэфиц. преломл. n_D	Коэфиц. объемн. расшир. 10⁻⁷ от 20° до 120°	Плотность г/см³
			$t = 20°$	t ~ 200°					
1	1. Стекла, содержащие только натровые окислы без калиевых	46-с	14	59	—	2.10⁸	—	138—143	—
2		Пирекс нормальный	12	35	5,3	2.10⁸	—	—	2,2
3		65	23	300	7,5	8.10⁶	1,5189	78,3	2,62
4		49	20	—	7,4	—	1,5262	92,5	2,73
5	2. Стекла, содержащие калиевые окислы или калиево-натровые	7	7	—	7,5	—	1,5147	89,6	2,48
6		Пирекс калиевый	6	6	5,7	8.10¹¹	—		2,2
7		Пирекс калиево-натр.	7	15	5,9	1.10¹⁰	—	—	2,2
8		12	5	—	7,5	—	1,5181	100,1	2,55
9		20	8	—	6,9	—	1,5100	81,2	2,46
10		707	7	12	—	—	—	—	—
11		23	10	27	—	8.10⁹	—	250—260	—
12		44	7	16	—	—	—	118 123	—
13		14	9	—	7,1	—	1,5163	78,4	2,53
14		16	8	19	—	—	—	260—270	—
15		2	5	—	7,5	—	1,5481	89,9	2,95

Таблица 20

Электрические и физические свойства стекол второй группы

№№ по пор.	Обозначение стекла	Угол потерь в минутах при $f = 1 \cdot 10^6$ гц		Диэлектрическая проницаемость ε	Удельное объемное сопротивл. при $t \cong 200°$ ом · см	Коэфициент преломления n_D	Коэфициент объемного расширения 10^{-7} от 20 до 120°	Плотность г/см³
		$t = 20°$	$t \cong 200°$					
1	28	3	—	7,0	—	1,5480	85,0	2,93
2	Минос	3	4	7,0	—	—	—	—
3	11	3	—	8,5	—	1,6475	72,3	3,87
4	16-Л	2	—	7,5	—	1,5783	62,1	3,21
5	47	2	5	7,5	$3 \cdot 10^{10}$	1,5730	77,6	3,18
6	23-Л	2	4	10,3	$2 \cdot 10^{12}$	1,7172	88,0	4,45
7	15	2	—	11,0	—	1,6259	89,5	3,67
8	13	4	—	7,6	—	1,5688	74,8	3,12
9	22	3	—	8,2	—	1,5646	76,6	3,10
10	30	4	—	7,5	—	1,5638	71,1	3,10
11	17	2	—	7,5	—	1,5399	83,9	2,85
12	Титановое	4	4	11,0	$1 \cdot 10^{13}$	—	—	3,45

Таблица 21

Электрические и физические свойства стекол третьей группы

№№ по порядку	Обозначение стекла	Угол потерь в минутах при $f=1\cdot10^6$ гц		Диэлектрическая проницаемость ε	Удельное объемное сопротивление $t\cong200°$ ом·см	Коэфиц. преломления n_D	Коэфиц. объемн. расширения 10^{-7} от 20° до 120°	Плотность г/см³
		$t=20°$	$t\cong200°$					
1	24	3	3	8,4	$3\cdot10^{13}$	1,6126	69,3	3,58
2	12	3	—	8,8	—	1,5891	62,4	3,30
3	Боратное	4	4	5,2	$>1\cdot10^{13}$	—	—	2,25

Все стекла II группы отличаются малым значением угла диэлектрических потерь. Из тяжелых окислов наиболее эф-

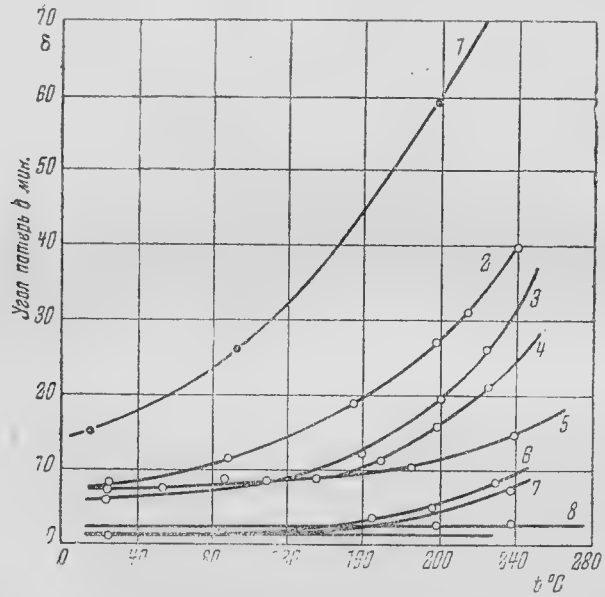


Рис. 157. Температурная зависимость угла диэлектрических потерь щелочных стекол, без тяжелых окислов и с тяжелыми окислами.
1—№ 46-с; 2—№ 33; 3—№ 16; 4—№ 44; 5—707; 6—47; 7—минос; 8—титановое стекло; 9—стекло № 23-л.

фективным является BaO, давая стекла с меньшими потерями и меньшей электропроводностью, чем соответствующие свинцовые.

Исключительно высокими электрическими свойствами отличаются бесщелочные стекла с тяжелыми ионами, как стекло № 24, № 19. Стекло № 24 и при высоких температурах имеет малые потери и низкую электропроводность.

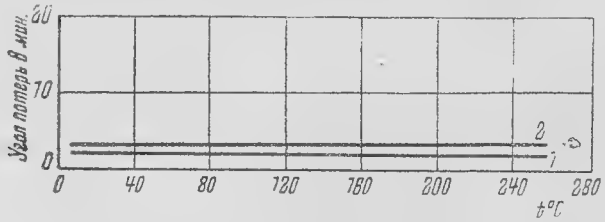


Рис. 158. Зависимость угла диэлектрических потерь от температуры для бесщелочных стекол.
1—стекло № 24; 2—боратное стекло.

Значительный интерес представляет боратное бесщелочное стекло. С электрической точки зрения оно обладает весьма хорошими показателями для использования его в качестве установочного материала.

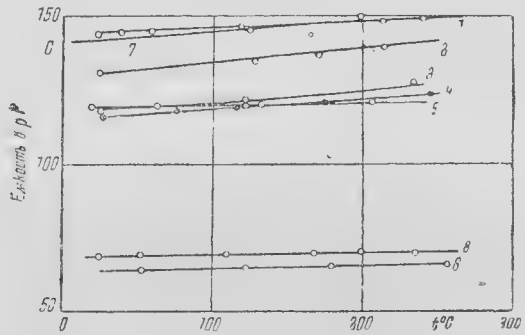


Рис. 159. Зависимость емкости от температуры различных стекол. Номера стекол: 1—707; 2—23; 3—46; 4—16; 5—пирекс нормальный; 6—минос; 7—17; 8—24.

Для всех стекол емкость возрастает с температурой. Относительный коэфициент емкости (рис. 159) довольно большой и колеблется в пределах от 100.10^{-6} до 500.10^{-6} на 1° в интервале температур от 20 до 220°С. Стекла с большим температурным ходом потерь имеют большой температурный коэфициент емкости. Наименьшими TK_{ε} отличаются титановое стекло и бесщелочное стекло с тяжелыми ионами № 24.

На рис. 160 представлена зависимость объемного сопротивления от температуры для стекол I, II и III групп. Как следует из рис. 160 и рисунков 156—158, общей закономерностью является наличие связи между величиной электропроводности при повышенных температурах и углом диэлектрических потерь. У стекла с повышенной электропроводностью наблюдается более раннее возрастание угла

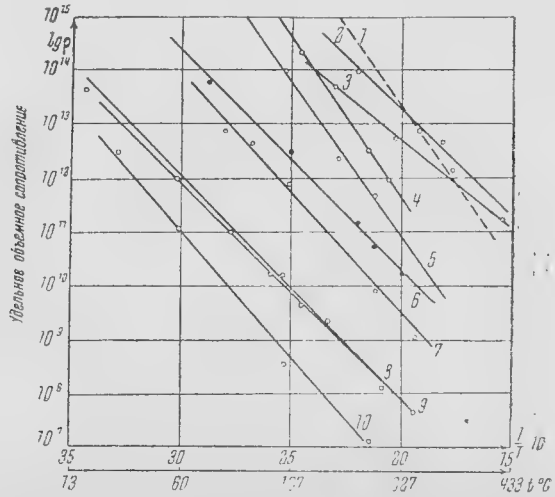


Рис. 160. Зависимость удельного объемного сопротивления от температуры для щелочных стекол (без тяжелых окислов и с тяжелыми окислами) и для бесщелочных стекол: 1 — кварц; 2—стекло № 24; 3—титановое стекло; 4—23-л; 5 — 47; 6 — пирекс калиевонатровый; 7 — 23; 8—пирекс натровый; 9—46-с; 10—65.

потерь с температурой. Температурный коэфициент объемного сопротивления силикатных стекол меньше, чем у чистого кварца. Поэтому при очень высоких температурах объемное сопротивление некоторых стекол (с большим содержанием окислов бария) превышает сопротивление плавленого кварца.

Структурные потери сильно выражены во всех технических стеклах. Чистый борный ангидрид, имеющий ничтожную электропроводность, также обладает заметными диэлектрическими потерями. Малыми структурными потерями обладает только чисто кварцевое стекло. Следует отметить, что введение в плавленый кварц даже небольшого количества каких-либо иных окислов вызывает резкое возрастание потерь.

В заключение в таблице 22 показано, как следует использовать технические стекла в соответствии с потребностями радиопромышленности.

Таблица 22

Применение технических стекол

Назначение стекла	Ламповые стекла	Конденсаторные стекла	Установочные стекла	Эмали
Общая характеристика	Силикатно-щелочные	Флинты и баритовые кроны	Кроны	
Номера и наименование стекол	№ 23 № 46 (молибденовое) № 707 № 44 № 16 № 65	Минос № 23а № 17 № 24 № 19	Пирекс калиевый Пирекс калиево-натровый ЗС-4 № 46	Боратные, свинцовые, фтористые
	Плавленый кварц			

§ 73. Плавленый кварц

Стеклом, отвечающим наиболее полно условиям работы установочных, конденсаторных и ламповых высокочастотных изоляторов, является чисто кварцевое (плавленый кварц).

Прозрачный плавленый кварц может быть отнесен к первоклассным диэлектрикам. Особенностью прозрачного кварцевого стекла являются исключительно высокие электрические характеристики, лучшие, чем у кристаллического кварца. Малое значение температурного коэфициента расширения делает плавленый кварц стойким к резким изменениям температуры. Однако, несмотря на высокие свойства, плавленый кварц находит ограниченное применение в радиопромышленности. Очень трудный технологический процесс производства плавленого кварца не позволяет широко использовать этот материал.

Плавленый кварц получают в результате плавки кристаллов горного хрусталя или кварцевого песка в специальных электрических печах при температуре около 1700°. Различают два сорта плавленого кварца: прозрачный аморфный кварц и непрозрачный. Прозрачный кварц изготовляется из горного хрусталя, непрозрачный — из чистого кварцевого песка. Прозрачная форма плавленого кварца бесцветна и при высококачественной выработке почти не содержит пузырей. Непрозрачный кварц имеет шероховатую поверхность или гладкую блестящую, в зависимости от

обработки. Непрозрачность кварца обусловлена наличием пузырьков, образующихся в процессе изготовления изделий.

Заметное снижение вязкости кварца происходит лишь в пределах температур 1700°—1750°. Трудности технологического процесса изготовления кварцевых изделий делают их достаточно дорогими. Конфигурация изделий из кварца самая простая — обычно они представляют собой трубочки диаметром 10—30 *мм*. Возможна также горячая прессовка кварцевого стекла, а также распиловка плавленых болванок алмазными пилами; кварц поддается шлифовке и полировке.

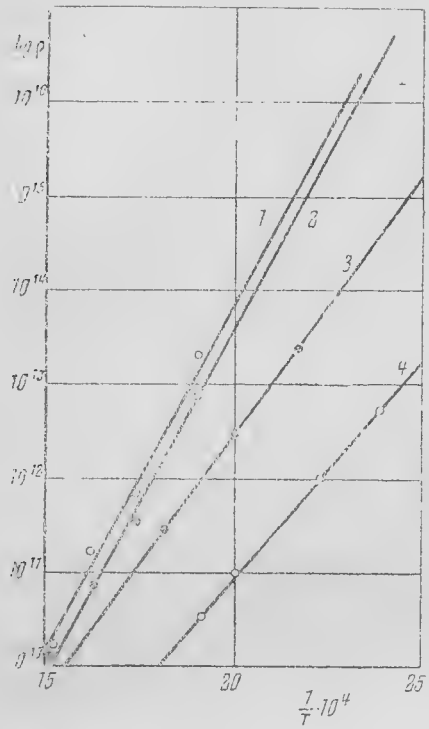


Рис. 161. Температурная зависимость удельного объемного сопротивления плавленого и кристаллического кварца. 1 и 2—плавленый кварц; 3 и 4—кристаллический кварц.
О—ρ—вычисленное по tgδ при f=50 *гц*.
О—ρ—измеренное на постоянном токе.

Плавленый кварц выдерживает резкие температурные колебания: кварцевая трубка, нагретая докрасна и брошенная в воду, не трескается. Кварцевое стекло пропускает ультрафиолетовые лучи. Исключительно велика механическая прочность на сжатие. Кислоты и щелочи на кварц практически не действуют; только плавиковая кислота сильно разъедает кварц. К недостаткам непрозрачного кварца нужно отнести гигроскопичность (наличие сети капилляров на поверхности его), что резко повышает диэлектрические потери материала.

На рис. 161 показана зависимость удельного объемного сопротивления плавленого кварца от температуры, измеренная на постоянном токе и вычисленная по $tg\delta$ при $f=50$ *гц*, сравнительно с теми же характеристиками кристаллического кварца.

Плавленый кварц в радиопромышленности находит основное применение как внутренний изолятор мощных генераторных ламп, а также в отдельных случаях используется для установочных изделий.

Таблица 23

Электрические, физические и механические свойства плавленого кварца

Свойства	Прозрачный кварц	Непрозрачный кварц
Диэлектрическая проницаемость ε	3,5	3.2
Диэлектрические потери: $tg\delta$ при $f=50$ *гц*	$<0{,}0003$	0,0005
при $f=2\cdot10^6$ *гц*	$<0{,}0003$	-
Температурный коэфициент диэлектр. проницаемости $\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon\Delta t}$	$+(20-50)\cdot10^{-6}$	—
Удельное объемное сопротивление при $t=500°$ (*ом · см*)	$1\cdot10^8$	$1\cdot10^8$
Удельное поверхност. сопротивление (*ом*) при 50% отн. влажн.	$5\cdot10^{13}$	—
при 90% отн. влажн.	10^8—10^{14}*)	—
Пробивная напряженность $\left(\frac{кв}{см}\right)$	350—400	120—200
Плотность (в *г/см*^{3})	2,2	2,07
Временное сопротивление (*кг/см*^{2}) сжатию	до 20000	2000—4000
растяжению	500—600	150—200
изгибу	600—700	300—500
Твердость по Моосу	5	—
Коэфициент линейного расширения	$0{,}5\cdot10^{-6}$	$0{,}5\cdot10^{-6}$
Теплопроводность $\frac{вт}{см\cdot°C}$	0,008	—

§ 74. Стеклянные проходные изоляторы

Наряду с керамическими вакуумно-плотными вводами в последнее время широко применяются стеклянные проходные изоляторы, обеспечивающие также полную герметичность. Большое распространение эти изоляторы получили как герметические вводы в бумажных, стирофлексовых, электролитических конденсаторах, в сухих выпрями-

*) Верхний предел соответствует чистой поверхности.

телях и т. д. По стоимости стеклянные изоляторы дешевле керамических при массовом производстве. Преимущество стекла в сравнении с керамикой заключается в возможности непосредственного сваривания металла с размягченным стеклом, причем при одинаковых коэфициентах расширения стекла и металла соединение остается прочным и герметичным.

Непременным условием для отсутствия напряжений в стекле является совпадение коэфициентов расширения стекла и металла в широком интервале температур. Этому требованию удовлетворяет, как известно из вакуумной техники, железо-никель-кобальтовый сплав — ковар (фернико) и молибденовая сталь. Электрические свойства, технологические характеристики и термостойкость молибденового стекла также отвечают требованиям, предъявляемым к стеклу при изготовлении проходных изоляторов. Металл для арматуры изолятора должен легко поддаваться лужению; этому требованию также удовлетворяет ковар.

Рис. 162. Основные типы стеклянных вводов.

На рис. 162 представлены конструкции трех основных типов стеклянных вводов, получивших практическое применение. Внутри каждого изолятора находится тонкостенная трубочка, через которую пропускается токоведущий провод герметизируемого изделия, конденсатора, выпрямителя и др. Снаружи изолятор имеет металлические шайбу, кольцо и колпачок. Наружные металлические детали изоляторов припаиваются к металлическому корпусу изделия. Шайбовый изолятор применяется преимущественно в качестве проходного изолятора через плоскую металлическую стенку, кольцевой — для торцовых вводов при цилиндрических корпусах, колпачковый — для цилиндрических корпусов больших размеров. Сварка металлической арматуры производится на специальных станках.

Все свободные металлические поверхности после сварки покрываются оловом. На нижнюю поверхность шайбового изолятора наносится избыток олова с таким расчетом, чтобы пайка его могла осуществляться паяльником или выдержкой в печи.

Изоляторы выдерживают резкие изменения температур в пределах от —50 до +80° и отличаются стойкостью к действию повышенной влажности.

В отдельных случаях вместо ковара (фернико) применяется железо — для деталей, свариваемых со стеклом снаружи, и феррохром — для деталей, находящихся внутри стекла.

При применении железа свариваемая со стеклом поверхность его предварительно покрывается тонким слоем неорганической эмали и только после этого производится сваривание со стеклом. Феррохром допускает наварку стекла без промежуточного слоя эмали.

В Союзе А. И. Романовым разработан метод соединения стекла с медью, обеспечивающий полную герметичность конструкции при малых размерах изделия.

Глава XVI

МИКАЛЕКС

§ 75. Общая характеристика

Микалекс является наиболее качественным из известных в настоящее время поделочных неорганических диэлектриков. Обычно микалекс изготовляется в виде листов путем горячей прессовки смеси порошкообразной слюды и тонко-размолотого легкоплавкого стекла.

В отличие от других неорганических диэлектриков — керамики, стекол, горных пород,— микалекс допускает сложную механическую обработку на металлорежущих станках, фрезеруется, точится, держит резьбу. Микалекс обладает высокой теплостойкостью, большой механической прочностью, в особенности на ударный изгиб, и малыми диэлектрическими потерями, в 4—5 раз меньшими, чем, например, у изоляторного фарфора. Таким образом в этом материале сочетаются наиболее благоприятные свойства неорганических диэлектриков с технологическими особенностями пластических масс, например, эбонита, гетинакса и других.

Главное применение микалекса — изоляция деталей мощных колебательных контуров, где указанные органические диэлектрики не могут удовлетворительно использоваться. Микалекс служит для изготовления держателей мощных ламп, панелей воздушных конденсаторов, гребенок катушек индуктивности, плат переключателей частоты и ряда других деталей радиопередающей и специальной аппаратуры. Наряду с этим микалекс применяется и в сильноточной промышленности как материал, устойчивый к действию высоких температур и дуговых разрядов, и в вакуумной сильно-

точной аппаратуре, где используется возможность герметично запрессовывать в микалекс металлические части.

Следует отметить, что сортамент микалекса значительно меньше, чем у органических поделочных материалов, например, у эбонита. Технологический процесс изготовления микалекса не позволяет выпуска продукции сложной конфигурации, полых цилиндров, изделий с неодинаковым сечением или с отверстиями. Микалекс изготовляется в виде досок, площадью около 500 *см*^{2} и выше, разной толщины—от 5 до 20 *мм*, а также в виде стержней дли-

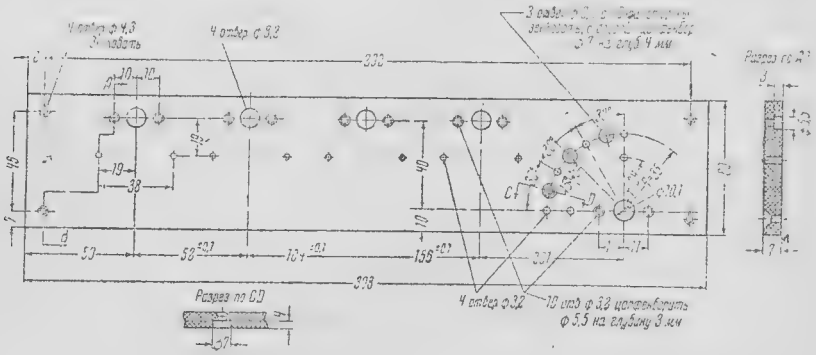


Рис. 163. Основание из микалекса.

ной 350 *мм*, диаметром до 35 *мм*. Такой сортамент суживает область применения микалекса. Каркасы катушек индуктивности, проходные и крупные опорные изоляторы из микалекса уже не могут быть получены. Незаменимым микалекс оказывается для изготовления плат и панелей большой площади, как показано на рис. 163—164, где керамику нельзя применять вследствие присущей ей склонности к короблению. Прессовка готовых мелких деталей из микалекса неэкономична, а обычно и невозможна по технологическим соображениям. Для обеспечения массовых заказов на мелкие детали все преимущества по сравнению с микалексом имеет радиокерамика. Здесь длительный технологический процесс керамики, затрудняющий оперативную производственную работу, не имеет значения; точность размеров керамических деталей, изготовляемых в большом количестве, может быть очень высокой. Наоборот, при опытных разработках, когда профиль деталей окончательно не установлен и подлежит частому изменению, или при серийных заказах, значительно проще ориентироваться на микалекс, из которого можно быстро получить тот или иной вид плоского изделия.

Технологический процесс микалекса энергоемок, требует использования большого числа мощных электрических

печей (по 30—50 *квт* в единице), мощных гидравлических прессов (500—1000 *т*), многих прессформ из нержавеющей стали; между тем, съем изделий с основного оборудования очень мал. В связи с указанным, микалекс дорог и, несмотря на свои ценные свойства, является „неходовым"

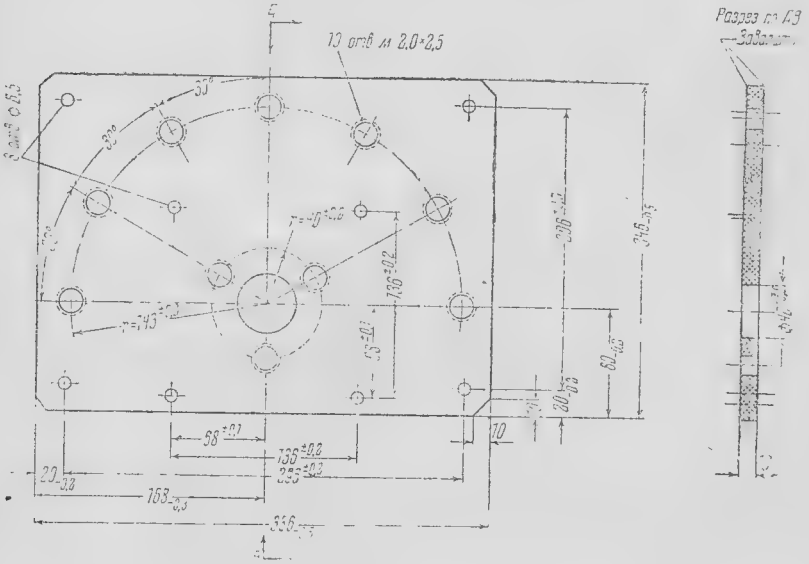


Рис. 164. Плата из микалекса.

материалом в радиопромышленности; пока он находит применение лишь на нескольких заводах страны, в условиях, где действительно уже никакой другой материал не может быть использован.

§ 76. Краткая технология

Производство микалекса в Союзе налажено около 10 лет назад. Первоначально у нас и за границей микалекс изготовлялся на основе борно-свинцового стекла. Свинцовый микалекс не мог удовлетворить требованиям промышленности ввиду дефицитности сырья, вредности в производстве (ядовитости прессовочного порошка) и большого веса деталей, изготовлявшихся из него. Вскоре свинцовое стекло было заменено бессвинцовым.

Технологический процесс производства микалекса, вне зависимости от состава связки, распадается на две операции: 1) изготовление прессовочного порошка и 2) прессовка микалекса. Прессовочный порошок состоит из смеси молотой слюды (так называемого микасатинета) с порошком легкоплавкого стекла, взятых в соотношении 60% слюды

и 40% стекла по весу. Слюда берется электротехническая—мусковит, причем используются отходы от штамповки очищенной обрезной слюды. Размер частиц слюды лежит в пределах сит № 50÷№ 60 (2500—3600 *отв/см*^{2}). Степень измельченности стекла определяется ситами № 90÷№ 100 (8100—10000 *отв/см*^{2}).

Стекло после варки его в плавильных печах гранулируется отливкой расплавленной массы в воду и затем измельчается в шаровых мельницах в присутствии воды. Смешение стекла со слюдой производят в тех же шаровых мельницах. Подсушенная смесь слюды и стекла подвергается таблетированию, т. е. предварительной холодной прессовке при давлении 400—500 *кг/см*^{2}. Таким путем получают заготовки изделий из микалекса, которые далее должны быть термически обработаны с целью вызвать оплавление частиц стекла и обеспечить, следовательно, их физико-химическую активность по отношению к раздробленной слюде. Микалекс, несомненно, не есть механическая смесь слюды и стекла; в процессе горячей прессовки эти компоненты химически реагируют между собой, образуя новую систему, с новыми физическими свойствами. Этим только можно объяснить полное отсутствие гигроскопичности микалекса.

Стекло, используемое для производства микалекса, является совершенно специфическим. Основное условие, которому оно должно удовлетворять,—это способность активно взаимодействовать с порошкообразной слюдой при очень низких температурах, при которых обычные технические силикатные стекла остаются еще или совсем твердыми или очень вязкими. Такое требование вызывается, с одной стороны, предельной температурой, допустимой для материала прессформы—стали, быстро изнашивающейся в процессе прессовки горячей массы,—с другой стороны, допустимой температурой печи с нихромовыми или фехралевыми обогревателями, и, наконец, температурной стойкостью слюды, для которой $t = 600—650^\circ$ является уже предельной; выше этой температуры наступает разложение слюды, и микалекс теряет механическую прочность.

Легкоплавкое стекло не может быть получено из нормальных силикатных систем. Даже среди технических бессвинцовых эмалей нельзя найти состава, удовлетворяющего в отношении температуры плавления. Требования, предъявляемые к связке для микалекса, осложняются необходимостью получить стекло высокой химической стойкости к действию влаги. Микалекс, применяемый в устройствах, работающих на открытом воздухе в условиях резко переменной влажности воздуха, должен состоять из компонент, вполне влагостойких, гарантирующих неизменяемость элек-

грических свойств с течением времени, т. е. отсутствие старения. Легкоплавкое бессвинцовое стекло для микалекса было найдено среди боратных, фтористых и щелочных систем с малым содержанием кислых окислов и известным содержанием окислов тяжелых металлов, в частности, окиси бария.

Существуют два способа термической обработки заготовок микалекса, разработанные в Союзе А. Т. Поповым. Один из этих способов состоит в том, что в печи (периодического действия или камерной) при температуре около 600° прогревается только заготовка микалекса. Пуансоны и матрица укреплены стационарно на прессе и обогреваются до много меньшей температуры—на 350—400° нихромовыми элементами, заложенными в пазы прессформы. Выдержанную в печи заготовку переносят при помощи транспортера на пресс, помещают на нижний пуансон прессформы и спрессовывают при давлении 500—600 *кг/см*^{2} в тот момент, когда изделие и пуансоны оказываются внутри подвесной обоймы—матрицы. Другой способ изготовления микалекса, применяемый частично и в настоящее время, отличается тем, что в печи при температуре 600—650° прогревается не только заготовка микалекса, но и пуансоны или вся матрица прессформы. После надлежащего прогрева изделие и раскаленные пуансоны устанавливают на пресс и дают давление. Спустя известное время, когда прессформа охладится, производится распрессовка изделия. Под действием высоких температур и давления пуансоны легко деформируются и быстро выходят из строя. Очевидно, что производительность этого способа изготовления микалекса меньше, чем способа отдельного нагрева заготовок. В связи с низкой производительностью технологического процесса микалекса цена готового продукта более чем в 10 раз превосходит стоимость сырья, являющегося недефицитным.

Изделия из микалекса, вне зависимости от принятого способа термической обработки, подвергаются медленному охлаждению в отжигательных печах в течение 10—15 часов и затем шлифовке основных поверхностей и обрезке краев.

Шлифовка микалекса оказывается совершенно необходимой при работе с пуансонами, обогреваемыми на прессе электрическими нагревателями. Ввиду сравнительно невысокой температуры таких пуансонов изделие имеет на поверхности слой непрореагировавших слюды и стекла, толщиной 1,5—2 *мм*, который и сошлифовывается в первую очередь.

Отжиг микалекса имеет назначение устранить внутримолекулярные натяжения. Диэлектрические потери и механическая прочность микалекса зависят от тщательности отжига. Неотожженный микалекс имеет диэлектрические потери, иногда в несколько раз превышающие нормальные. Такое

явление будет понятно, если сопоставить его с отмеченными ранее закономерностями в возрастании угла потерь для закаленных стекол. Особенное значение отжиг имеет в случае толстых пластин и шестигранок. При недостаточном отжиге в них образуются мелкие трещины, предопределяющие поломку детали при механической обработке.

Брак, возникающий при производстве микалекса, обычно сводится к тому, что изделие оказывается пористым, гигроскопичным, или, наоборот, слишком остеклованным, механически мало прочным. Большое значение имеет интервал размягчения стекла. Важно, чтобы оно оставалось вязким в широком интервале температур. Если стекло жидкоплавкое, оно уже при небольшом повышении температуры против нормальной интенсивно растворяет слюду. Микалекс в сечении становится однородным, как бы литым; механическая прочность сильно падает. При недогреве стекло и слюда не реагируют, материал остается пористым. Применение высокого давления при прессовке значительно облегчает реакцию взаимодействия слюды со стеклом.

Давление при прессовке микалекса зависит не только от мощности пресса, но определяется конструкцией прессформы. Совершенно неблагоприятны (в смысле обеспечения высокого давления) прессформы для изготовления шестигранок, с пуансонами, имеющими не плоские давящие поверхности, а типа швеллера. Ввиду малой текучести прессовочного порошка давление в таких прессформах приходится, в основном, на кромки пуансонов; середина изделия оказывается недопрессованной и обладает повышенной гигроскопичностью.

При выборе конфигурации изделий из микалекса следует избегать таких форм, которые не могут обеспечить нужного давления при прессовке, например, шестигранное сечение желательно заменять квадратным и т. п.

§ 77. Свойства микалекса

С точки зрения диэлектрических потерь, отсутствия гигроскопичности, теплостойкости и механической прочности микалекс может быть сопоставлен только с одной группой диэлектриков—установочной радиокерамикой. Применение микалекса будет эффективно, если габариты деталей из него не будут превосходить габариты керамических изделий. Последнее обстоятельство определится механической прочностью и обычно величиной угла диэлектрических потерь при допустимой рабочей температуре изолятора.

На рис. 165 представлена температурная зависимость угла диэлектрических потерь микалекса при измерении перпендикулярно и вдоль слоев. Ниже в таблицах приведены элек-

трические и физико-механические свойства микалекса. В отношении диэлектрических потерь микалекс близок к керамическим диэлектрикам установочного типа, имеющим широкое распространение в промышленности, например, радиофарфору. Обращает, однако, внимание большой разброс значений угла потерь микалекса. Как следует из приведенных данных, tgδ микалекса сильно колеблется, превышая минимальные значения до двух раз. Особенностью микалекса является неравнозначимость угла диэлектрических потерь

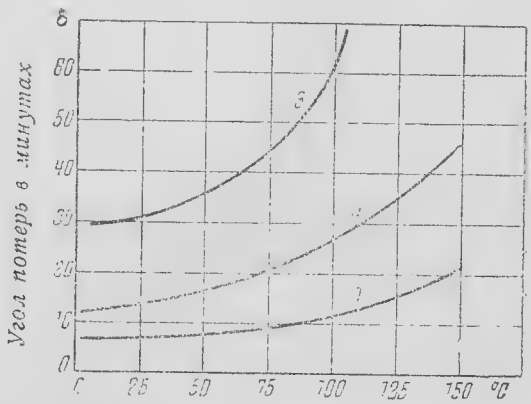


Рис. 165. Температурная зависимость диэлектрических потерь микалекса и изоляторного фарфора при $f=1 \cdot 10^6$ *гц*.
1—микалекс, перпендикулярно слоям;
2—микалекс, вдоль слоев;
3—изоляторный фарфор.

в двух взаимно перпендикулярных направлениях—поперек и вдоль слоев. При всех условиях технологического процесса диэлектрические потери вдоль слоев в 1,5—2 раза больше, чем поперек слоев. Такая анизотропия электрических свойств обусловлена примесными железистыми окислами, находящимися на плоскостях спайности кристаллов слюды. Эти примеси, конечно, сказываются и на потерях поперек слоев, в результате чего значения угла потерь микалекса не являются неизменными. Большое влияние на диэлектрические потери имеет характер газовой среды при обогреве таблеток, как это было указано ранее. При неправильно выбранной газовой среде целые партии микалекса оказываются браком. Чаще, однако, брак сводится к пористости изделий. С технической стороны имеется, конечно, возможность выпускать микалекс с углом потерь при радиочастотах, не превосходящим 5′—6′ во всех партиях.

Электрические свойства микалекса

Угол диэлектрических потерь (δ) при $f = 1 \cdot 10^3 \div 3 \cdot 10^6$ *гц* в минутах поперек слоев	
а) в воздушно-сухом состоянии	5—10
б) после 48 часов выдержки в воде	6—12
в) при 100°С	15
Диэлектрическая проницаемость при радиочастотах (ε)	7,5
Удельное объемное сопротивление при $t = 100$°С (в *ом · см*)	10^{12}
Удельное поверхностное сопротивление при 90% влажности (в омах)	$> 10^{10}$
Температурный коэфициент диэлектрической проницаемости $\left(\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon\Delta t}\right)$ при $t = 20-100$°С	$+300 \cdot 10^{-6}$
Средняя пробивная напряженность при $f = 50$ *гц* (в *кв/см*^{2})	150

В связи с возможностью значительного отклонения электрических свойств микалекса от нормальных значений необходимо, чтобы потребители микалекса вели правильный контроль электрических свойств. Одним из распространенных заводских методов испытания является измерение поверхностного сопротивления готовых деталей при помощи меггера после увлажнения. Более целесообразно проводить испытания листового или стержневого материала до механической обработки. Надежным испытанием микалекса, предопределяющим также значение поверхностного сопротивления, является измерение угла диэлектрических потерь после выдержки пластин в течение 24 часов в воде. Следует рекомендовать также испытание листового материала на высокочастотном генераторе с электродами-болтами, отстоящими друг от друга на расстоянии 30—40 *мм*. В этом случае могут быть проверены электрические свойства вдоль слоев; напряжение начала поверхностного разряда зависит от плотности прилегания болтов к материалу.

Физические и механические свойства микалекса

Плотность	2,8
Допустимая рабочая температура при длительном воздействии (°С)	350
Временное сопротивление (в *кг/см*^{2})	
на изгиб	1000—1200
на растяжение	300—400
на сжатие	2500 - 3000
Удельная ударная вязкость (в *кг · см/см*^{2})	2,5
Твердость по Бринеллю, в *кг/мм*^{2}	40—50
Коэфициент линейного расширения в интервале $t = 20-150$°	$9 \cdot 10^{-6}$
Теплопроводность (в *вт*/°С *см*)	0,003

Пористый микалекс не может быть улучшен ни пропиткой, ни лакировкой, поскольку обычные органические составы не вступают в химическое соединение с силикатами. Покрытие кремнеорганическими соединениями микалекса еще не опробовалось.

Химическая стойкость микалекса определяется прежде всего свойствами слюды. Микалекс не стоек к действию концентрированных кислот HCl, HNO_3 и насыщенных щелочей, например, NaOH. Химическая устойчивость к действию влаги у отечественного микалекса высокая. Растворимость тонко измельченного микалекса при длительном кипячении в воде почти не отличается от растворимости, свойственной, например, оконному стеклу.

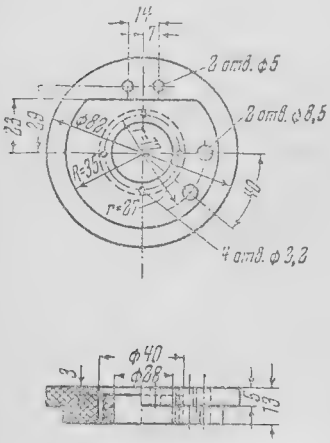


Рис. 166. Плата из микалекса.

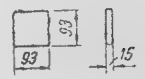
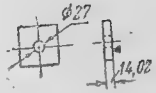
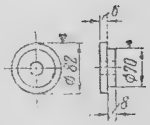
Механическая прочность микалекса, так же как и электрические его свойства, в сильнейшей степени зависит от режима прессовки и от микроструктуры. Микроструктура микалекса определяется прежде всего размером частиц слюдяного порошка.

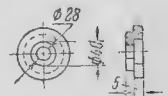
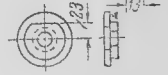
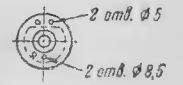
Чем меньше размер частиц слюды, тем однородней микалекс и тем слабее выражена его слоистость. С другой стороны, если использовать очень мелкую слюду, микалекс получается стеклообразным, механически непрочным. Удельная ударная вязкость микалекса выгодно отличается от обычной установочной керамики. Временное сопротивление на изгиб микалекса в два раза превосходит прочность изоляторного фарфора или пирофилита.

Слоистая структура микалекса и хрупкость, свойственная многим неорганическим материалам, вызывают известные затруднения при механической обработке. Снижение брака при изготовлении различных деталей из микалекса должно осуществляться не только за счет улучшения качества материала, улучшения его механических свойств, но и путем применения правильных методов обработки. Методы резания, которые применяются к металлам или к пластическим массам, для микалекса не пригодны.

Ниже приводится техническая карта на обработку детали из микалекса, показанной на рис. 166, составленная одним из заводов-потребителей и нормы на обработку микалекса, заимствованные из литературных данных.

Технологическая карта на изготовление платы из микалекса

№№ п/п.	Перечень работ и последовательность операций	Инструмент	Зажимн. приспособление	Скорость резания	Число оборот. шпинделя в мин.	Подача на оборот.	Глубина резания	Число проходов	Вид детали в процессе обработки
1	Разрезать лист на квадратные куски 15×93×93	Фрезо—пила 80×3 Р—18 = 44	Планки	12	48	1,3	15	1	
2	Сверлить ⌀12, рассверлить ⌀25. Проточить плоскость, расточить ⌀27	Сверло ⌀12 ⌀25 угол вершины 70° резец подрезн. расточ. Р⌀ — 1 α = 10° γ = 5°	4-х кулачк. патрон.	8 10 прог. расст.	102 38 88	0,4 0,3 0,2	6,5 0,3 0,5	1 2 2	
3	Проточить нар. ⌀84	Резец проходной победит. Альфа 21 α = 6° γ = 5°	Оправка шариков центр.	18,5	70	0,2	6	4	
4	Проточить ⌀70 на дл. 6 мм и ⌀82 мм дл. 6 мм	Резец проходной победит. Альфа 21 α = 6° γ = 5°	Оправка шариков центр.	18,25	70 70	0,2 0,2	7 1	1 1	

№№ п/п.	Перечень работ и последовательность операций	Инструмент	Зажими. приспособление	Скорость резания	Число оборот. шпинделя в мин.	Подача на оборот.	Глубина резания	Число проходов	Вид детали в процессе обработки
5	Проточить плоскость, расточить ⌀40 на глуб. 3, расточить ⌀28 на дл. 10	Резец проходной победит. Альфа 21 $\alpha = 6°$ $\gamma = 5°$	Оправка разрезная	18,25 10 10	70 80 80	0,2 0,2 0,2	0,5 3 0,5	2 1 1	
6	Фрезеровать сегмент	Фрез. наз. ⌀90×14 Z = 26 P = 15	Оправка планка	12	42	1	8	1	
7	Сверлить по кондуктору 8 отв. ⌀2,2	Сверло ⌀2,2 угол заточки 70° кондуктор		2,8	300	0,1	1,1	1	
8	С двух сторон рассверлить два отв. ⌀8,5 и 2 отв. ⌀5	Сверло ⌀5,5 „ ⌀8,8 угол заточки 70°		6,3 8	300 200	0,1 0,1	1,9 8,7	1 1	

При рассмотрении этих норм видно, какое внимание уделяется вопросам механической обработки микалекса и какие предосторожности принимаются для снижения брака при изготовлении деталей.

§ 78. Нормы на механическую обработку микалекса

Обработка микалекса не вызывает существенных затруднений. Однако для правильного и экономичного использования этого материала необходим специальный инструмент.

Резка

Обычная механическая пила режет микалекс легко, но медленно. Для быстрой и недорогой распиловки микалекса рекомендуется два других метода:

1. Применение циркулярной пилы. Пила имеет 4—5 зубьев на сантиметр при скорости 420 *м/мин.*

2. Карборундовый круг, применяемый в стационарном настольном оборудовании. Скорость вращения—3600 *об/мин.* Диаметр круга 300 *мм*, толщина 3 *мм.* Карборунд № 50, марка 40. При распиловке рекомендуется смачивание непрерывным потоком воды. При разрезании толстых листов начинают лист резать с одной стороны, а заканчивают с другой. Этим приемом устраняется зажимание и торможение режущего инструмента.

Сверление

Микалекс может сверлиться на обычном сверлильном или на токарном станке при условии применения соответствующих инструментов и скорости подачи. Скорость резания будет определяться размерами сверла, и подача регулируется умением рабочего, опытность которого имеет большое значение. Поливка водой удлиняет срок службы сверл и позволяет повысить скорость сверловки. Хорошей средней скоростью для сверл диаметром до 6,5 *мм* оказывается 500 *об/мин.* Для сверл от 6,5 до 13 *мм* скорость должна быть снижена, примерно, до 250 *об/мин.* Подача должна быть около 25 *мм* в минуту для сверла диаметром 6,5 *мм.*

При применении сверл большего диаметра подача должна быть соответственно понижена. Рекомендуются цементированные сверла и поливка водой. Чистые отверстия получаются при применении шаблонов или кондукторов, с помощью которых материал поддерживается вокруг образующегося отверстия. Если применение шаблонов или кондукторов не может быть обеспечено, материал должен плотно

придерживаться при приближении к концу отверстия. Микалекс, подвергающийся сверлению, должен иметь прочную, плоскую подкладку, предохраняющую материал от обкалывания на нижней поверхности.

Чрезвычайно важно по возможности устранить возникновение усилий или напряжений в материале при обработке, поэтому при сверловке больших отверстий, диаметром больше 15 *мм*, сверловщик сначала должен пройти отверстие сверлом половинного диаметра, а затем работать сверлом требуемого размера.

Полировка и шлифовка

Для шлифовки рекомендуется применение карборундового точильного камня при скорости около 175 *об/мин*. Для полировки применяется войлочный круг и порошкообразные соли щавелевой кислоты.

Глава XVII

ОБРАБАТЫВАЮЩИЕСЯ МАТЕРИАЛЫ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ

§ 79. Общие замечания

Группа неорганических диэлектриков, в которую входят мрамор, асбоцемент, талькохлоритовый камень и шифер, удовлетворяет потребность электропромышленности в листовом материале, используемом при повышенных температурах, или когда возможны дуговые разряды.

Все названные диэлектрики имеют пористую структуру, гигроскопичны, отличаются невысокой механической прочностью. Механической обработкой (пилкой, сверловкой, обточкой) этих материалов возможно получение лишь очень простых по форме и имеющих достаточную толщину деталей.

С точки зрения электрических свойств следует выделить мрамор, который при нормальной влажности воздуха отличается малыми диэлектрическими потерями и объемным сопротивлением, более высоким, чем у асбоцемента или, например, талькохлорита. Благодаря декоративному внешнему виду, мрамор нашел основное применение для распределительных щитов низкого напряжения. Применение в электропромышленности талькохлорита, и в особенности асбоцемента, шире, чем мрамора. Из талькохлорита изготовляются колодки и основания для реостатов, а также основания под рубильники небольшого размера.

Асбоцемент находит довольно широкое применение в сильноточном аппаратостроении. Из асбоцемента изготовляются искрогасительные камеры, искрогасительные перегородки, доски для монтажа шин и выводов в печах, сушильных шкафах и др.

Наименее распространенным из рассмотренных материалов является шифер. Шифер обладает резко выраженной слоистостью, гигроскопичен; применение его ограничено как вследствие низких электрических характеристик, так и ввиду очень незначительной выработки в соответствующих месторождениях.

§ 80. Мрамор

Мрамор представляет собой кристаллический известняк, состоящий из карбоната кальция ($CaCO_3$), чистого или с примесью углекислого магния ($MgCO_3$), вплоть до состава типичного доломита ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$). Иногда мраморами называют и другие породы, способные полироваться. Кальцитовый мрамор содержит от 96 до 99 % карбоната кальция; доломитовый мрамор содержит карбонат кальция и карбонат магния приблизительно в равных количествах. Величина зерен карбоната, из которых состоит мрамор, колеблется от 0,02 *мм* до 5 *мм*. Размеры и очертания зерен сказываются на механической прочности мрамора. Наиболее прочными сортами являются мелкозернистые мраморы.

Мрамор, имеющий зубчатую структуру зерна более прочен, чем мостовидный. Кальцитовый мрамор прочнее доломитового. Цвет мрамора зависит от вида примесей. Красный, розовый цвет объясняется примесью марганца; серый или черный — присутствием углистых веществ и т. д. Очень часто в состав мрамора входит ряд минералов, как кварц, графит, флогопит и др. Включение кварца делает мрамор механически трудно обрабатывающимся; большинство же сортов мрамора хорошо сверлится обыкновенным сверлом, пилится, поддается обточке на токарном станке и прекрасно полируется. Иногда в мраморе встречаются проводящие или полупроводящие прожилки железистых окислов; такие образцы не могут быть употребляемы для изоляции.

Мрамор практически не растворяется в воде, но легко подвергается действию кислот. Длительный нагрев без изменения свойств возможен до температуры 100—110°; кратковременные нагревы до температуры 250° также не сказываются на его свойствах.

Механические свойства мрамора меняются в зависимости от сорта. Временное сопротивление изгибу лежит в пределах 100—200 *кг/см*^{2}. Твердость кальцита по шкале Мооса—3,

доломита 3,5—4. Удельный вес кальцитового мрамора 2,7, доломитового—2,9.

Электрические свойства мрамора, в основном, определяются степенью увлажнения его. Количество влаги, поглощаемой мрамором после выдержки в воде, оказывается очень незначительным и составляет в зависимости от сорта всего 0,1—0,2 % по весу, но тем не менее, электрические свойства мрамора при этом резко снижаются. Гигроскопичность мрамора, как известно, является одним из главных препятствий, не позволяющих применять этот материал для ответственных назначений. Однако, как показывает опыт, мрамор можно сделать негигроскопичным путем пропитки его (методом проварки или вакуумной) стиролом, канифолью, парафином. Пропитка происходит глубинная, и это позволяет обрабатывать материал в случае необходимости уже и после пропитки, не боясь того, что могут вскрыться поры. Наименьшими диэлектрическими потерями обладают мраморы, содержащие минимальное количество посторонних примесей, в особенности полупроводящих. Практически белые мраморы оказываются лучше окрашенных. При высокой частоте $tg\delta$ белого сухого мрамора составляет $\sim 0{,}001$. Удельное объемное сопротивление мрамора при относительной влажности воздуха 65—70% $\geqslant 10^9$ *ом · см*. Электрическая прочность в однородном поле 20—30 *кв/см*.

В СССР месторождения мрамора находятся на Урале, Кавказе, в Карелии, в Средней Азии, в Забайкалье, на Алтае. Некоторые сорта союзных мраморов отличаются очень высокими свойствами.

§ 81. Талькохлорит

Талькохлоритовый камень—горная порода, представляющая смесь минерала талька $3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$ и хлорита (алюмо-кальциево-магниевого силиката) и небольшого количества карбонатов кальция, магния и железа. Цвет камня—серый. Порода очень мягкая, мелкозернистая, легко поддается механической обработке. Твердость по Моосу—2. Талькохлорит выпускается в виде досок, толщиной от 12 до 30 *мм*, площадью до 2000 *см*^{2}, и в виде брусков, толщиной в пределах от 10 до 120 *мм* и с отношением ширины к толщине менее 3. Удельный вес талькохлорита 2,7—2,9. Временное сопротивление на изгиб порядка 250 *кг/см*^{2}. Водопоглощение за 48 часов пребывания образца в воде 0,25—0,3%. Термическая стойкость талькохлорита хорошая. Пластина из талькохлорита размером 150 x 150 *мм*, толщиной 25 *мм*, нагретая до 500°, может быть опущена в воду без обнаружения в ней трещин. Талькохлорит стоек к действию кислот и щелочей. Обжиг при температуре около 1000° вызывает резкое изменение физических свойств. Механиче-

ская прочность обожженного талькохлорита возрастает, но сильно увеличивается гигроскопичность. Пропитка органическими составами не устраняет гигроскопичности талькохлорита, повидимому, в связи с наличием у него субмикроскопической пористости. Электрическая прочность талькохлорита при $f=50$ *гц* и толщине образца 10 *мм* составляет 20—30 *кв/см*; tgδ при высокой частоте—0,15.

В СССР талькохлоритовый камень добывается в Карельской ССР в юговосточной части озера Сег.

§ 82. Асбоцемент

Асбоцементные изделия изготовляются из волокнистого асбеста и высококачественного цемента с добавлением воды для схватывания цемента. Часто в качестве компоненты в массу вводится тальк. Соотношение отдельных компонент выбирается близкое к следующему: асбест — 25%, портландцемент марки 000 — 65%, молотый тальк — 10%.

Асбест является минералом волокнистого строения, большие месторождения которого в Союзе имеются на Урале. Известны различные разновидности асбестовых минералов — серпентинный асбест (хризотил) серого цвета, крокидолит голубого цвета. Основное промышленное значение получил хризотил—водный силикат магния $3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$, имеющий прочные волокна, длиной до 100 *мм*, в очищенном виде шелковисто-белого цвета.

Портландцемент изготовляют на специальных цементных заводах путем обжига смеси глины и известняков (мергелей) до температур порядка 1400—1500°. Обожженный цемент представляет собой в основном трехкальциевый силикат $3CaO \cdot SiO_2$ и трехкальциевый алюминат $3CaO \cdot Al_2O_3$. При воздействии на обожженный портландцемент влаги трехкальциевый силикат переходит в водный моносиликат кальция и гидрат кальция, причем процес затвердевания цемента сопровождается частичной кристаллизацией этих соединений.

Для изготовления асбоцементных досок асбест, предварительно обработанный (разрыхленный наподобие ваты), подвергается смешению с портландцементом и тальком, после чего в смесь добавляется необходимое количество воды. Масса поступает на сетки асбоцементной машины, где удаляется избыточная влага, а затем подвергается прессовке на гидравлических прессах при удельном давлении 300—400 *кг/см*^{2}. Доски из асбоцемента после прессовки выдерживают около суток на воздухе, после чего загружают в воду для окончательной гидратации. Для ускорения схватывания изделия обрабатываются насыщенным паром. Когда

процесс схватывания цемента закончен, детали высушивают сперва при невысоких температурах, затем при 150°.

Асбоцемент характеризуется довольно высокой механической прочностью (временное сопротивление изгибу 300—400 *кг/см*^{2}, удельная ударная вязкость 3—5 *кг · см/см*^{2}), но гигроскопичность его очень велика. Водопоглощение после 48 часов выдержки в воде доходит до 25%. Рабочая температура при длительном воздействии может быть принята до 400—450°. Изделия выдерживают также дуговые разряды по поверхности.

Пропитывание асбоцемента битуминозными составами резко снижает гигроскопичность, но пропитанный асбоцемент уже не может быть отнесен к группе жаростойких материалов.

§ 83. Шифер

Шифер представляет собой глинистый сланец с ясно выраженной слоистостью, дающий при расколе ровные плиты. Основными составными частями шифера по химическому анализу являются кремнезем SiO_2 (около 60%) и глинозем Al_2O_3 (около 20%). В состав шифера входят также в небольших количествах MgO, CaO, FeO, Fe_2O_3, CO_2, K_2O, Na_2O и H_2O. Цвет шифера—темносерый с различными оттенками.

В результате метаморфических изменений сланцев, если процесс не завершился, образуется так называемый глинистый шифер, в состав которого входят в основном глинозем, слюда и хлорит. Более глубокие изменения сланца ведут к образованию так называемого слюдистого шифера, состоящего в основном из слюды, кварца и хлорита.

Слюдистый шифер менее гигроскопичен, чем глинистый и находит наибольшее применение в электротехнике. Невысокие электрические свойства шифера, частое присутствие в нем железистых включений, большая гигроскопичность позволяют применять его только для самых неответственных целей, преимущественно в случае воздействия высоких температур. Нагревание шифера до температуры 200—250° не вызывает в нем никаких изменений. Большинство кислот и щелочей на шифер не действует.

По механическим свойствам шифер превосходит мрамор и талькохлоритовый камень.

В Союзе залежи шифера имеются на севере в Архангельской области; промышленная добыча шифера очень ограничена.

Свойства обрабатывающихся неорганических диэлектриков—микалекса, асбоцемента, мрамора, талькохлорита и шифера—приведены в сводной таблице 24.

Таблица 24

Свойства обрабатывающихся неорганических материалов

Свойства \ Наименование материала		Микалекс (на свинцовой и бессвинцовой основе)		Асбоцемент	Мрамор	Талькохлорит	Шифер
Основная характеристика		Очень высокие электрические и хорошие механические свойства, возможна сложная мех. обраб.		Большая теплостойкость (до 500° С), огнестойкость, очень гигроскопичен	Красивый внешний вид, малые диэлектрич. потери, сильно гигроскопичен	Пригодны лишь при низких напряжениях и низких частотах вследствие гигроскопичности	
Область применения		Изоляция мощных радиопередатчиков; изоляция вакуумной сильноточной аппаратуры		Изоляция сильноточной электроаппаратуры, нагревательных приборов, реостатов	Распред. щиты низкочастотной техники. После пропитки стиролом, парафином возможно использ. при высоких частотах	Доски для крепления рубильников, основания реостатов, панели на электропечах	
Угол диэлектрич. потерь при радиочастотах в мин. при 20° С	В сухом состоянии	6—8	поперек слоев	250—400	2—3	~ 100	~ 100
	После 24 час. выдержки в воде	8—12	поперек слоев	—	> 500	~ 500	~ 500
Угол диэлектр. потерь при радиочастотах в мин. при 100° С		10—12 (поперек слоев) 15—25 (вдоль слоев)		200—250	3—4	~ 200	~ 200
Диэлектрическая проницаемость		7—7.5 (бессвинцовая связка) 7,5—8 (свинцовая связка)		6 ÷ 8	8 ÷ 9	7—8	6—7

Свойства \ Наименование материала		Микалекс (на свинцовой и бессвинцовой основе)	Асбоцемент	Мрамор	Талькохлорит	Шифер
Удельное объемное сопротивление в *ом · см*	t=100°C	$5 \cdot 10^{12}$	10^9—10^{10}	10^{10}—10^{11}	10^9	10^8—10^9
	t=300°C	10^{10}	—	—	—	—
Средняя пробивная напряженность в $\frac{кв}{см}$ $U_{эфф}$ при 50 *гц*		150	20—25	20—50	30	5—10
Плотность в *г/см*^{3}		2,8 (бессвинцовая связка) 3,5 (свинцовая связка)	1,8	2,7	2,8—2,9	2,7—2,9
Временное сопротивление в *кг/см*^{2}	Изгибу	1 000—1 200	250—350	100—300	250	300—500
	Растяж.	300—400	30—50	100—200	—	—
	Сжатию	2 000—2 500	500—600	1 000	800—1 000	700—1 000
Удельная ударная вязкость в $\frac{кг \cdot см}{см^2}$		2,5	4—6	2,5	3	3,5
Коэфициент линейного расширения		$9 \cdot 10^{-6}$	—	$3 \cdot 10^{-6}$	—	$1 \cdot 10^{-6}$
Теплопроводность в $\frac{вт}{°C \cdot см}$		0,01	0,005	0,03	0,008	0,008
Водопоглощение в %		0	15—25	0,1—0,3	0,3	0,3—1,0

Глава XVIII

ДИЭЛЕКТРИКИ—МОНОКРИСТАЛЛЫ

§ 84. Слюда

Слюда является единственным минералом, получившим широкое значение как качественный установочный и конденсаторный высокочастотный диэлектрик. Слюда в виде монокристаллов имеет в электропромышленности следующие применения.

1. Изоляция электродов внутри электронных ламп в виде штампованных сложного профиля пластинок с отверстиями, через которые проходят электроды, а также фасонная изоляция авиасвечей.

2. Диэлектрик высокочастотных низковольтных и высоковольтных конденсаторов.

3. Миканитовая изоляция (клееная и прессованная слюда).

4. Изоляция в нагревательных приборах.

В измельченном состоянии слюда является основой для изготовления микалекса, а также служит наполнителем пластических масс и в некоторых случаях наполнителем резиновой изоляции.

По минералогическим признакам слюда относится к группе алюмосиликатов, имеющих кристаллическое строение, отличающихся совершенной спайностью по основному пинакоиду и раскалывающихся по одному направлению на чрезвычайно тонкие листочки. Гибкость и упругость отличают слюду от других минералов, аналогичных по структуре.

Из ряда разновидностей слюд в электротехнике имеют значение слюда-мусковит и слюда-флогопит.

Мусковит представляет собой водный алюмосиликат калия с примесями натрия, магния, извести, фтора, окиси—закиси железа и отвечает формуле $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$.

Мусковит прозрачен в тонких слоях, в толстых—просвечивает. По окраске различают бесцветный, белый, зеленый, розовый, бурый и др. мусковиты. В мусковите иногда содержатся различные включения в виде пятен и дендридов. Эти включения придают слюде неравномерную окраску. Цвет пятен обычно черный, бурый, рыжий.

Вторая разновидность — слюда-флогопит $K_2O \cdot 7MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 7SiO_2 \cdot 3H_2O$ — представляет собой водный алюмосиликат магния и калия, где часть магния иногда замещается закисью железа; в качестве примесей во флогопите присутствуют окись натрия и фтор. Цвет флогопита бурый, янтарный, золотистый, изредка зеленый; флогопит малопрозрачен, отличается большой мягкостью.

Химический состав мусковитов и флогопитов представлен в таблице 25.

Таблица 25

Химический состав слюды

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	MnO	FeO	Li_2O	H_2O
1. Мусковит												
Сибирский мусковит (месторожд. р Мама)	46,74	35,68	1,85	0,17	—	—	—	—	—	—	—	4,52
Уральский мусковит (месторожд. Ильменское озеро)	45,02	37,66	2,10	0,05	0,56	0,32	—	—	—	—	—	4,54
Карельский мусковит (месторожд Слюдозеро)	45,96	34,10	1,09	0,79	0,18	1,46	10,23	—	следы	0,21	—	4,73
Карельский мусковит (месторожд. Редкие)	45,47	30,90	3,60	0,43	0,16	1,90	10,22	0,82	0,03	1,48	—	4,78
Индийский мусковит	45,71	36,57	1,19	—	0,46	0,71	9,22	0,79	—	1,07	0,12	4,83
2. Флогопит												
Сибирский янтарный флогопит	38,19	16,13	0,44	0,19	—	26,51	8,70	0,10	0,08	1,77	—	4,79
Сибирский темный (зеленый) флогопит	38,68	16,83	0,77	0,14	—	24,60	8,70	следы	0,05	3,18	—	4,85
Канадский флогопит (Вигден)	39,66	17,00	0,27	0,56	—	26,49	9,97	0,60	—	0,20	2,24	2,99

В технике высоких частот находит применение только слюда-мусковит, имеющая значительно лучшие электрические характеристики (диэлектрические потери), чем слюда-флогопит.

В СССР главнейшими месторождениями слюды являются Карелия, Сибирь, Урал и Украина.

В Карелии добывается мусковит, главным образом, у западного побережья Кандалакшского залива, в окрестностях Лоухского и Пулонгского озер и в районе озера Тедина. Карельские слюды, в особенности тединская слюда, отличаются очень высокими электрическими свойствами.

Из уральских месторождений промышленное значение имеют Кыштымское, Ильменское и Вишневые горы.

Главнейшие месторождения слюды в СССР находятся в Сибири, где добывается мусковит и флогопит. Главные месторождения мусковита находятся в районе рек Мамы и Витима и в Бирюссинском районе.

Слюда в природе обычно сопровождается другими породами: кварцем, полевым шпатом и т. п.

Разработка слюдяных залежей ведется открытыми карьерами или подземными выработками. Взрывные работы должны вестись таким образом, чтобы по возможности сохранить кристаллы слюды. После выемки слюды из жилы, она очищается от посторонних пород; в таком виде слюда носит название комовой или сырой слюды. Средний выход комовой слюды из породы составляет $1—2\%$. В отдельных случаях выход повышается до $7—10\%$. Сырая слюда сортируется, при этом ее подвергают расколке. Колотая слюда представляет собой пластины, не содержащие явно дефектных частей.

По величине площади слюда подразделяется на 11 размеров (номеров); номер каждого размера определяется площадью вписанного в контур прямоугольника, с соотношением сторон не более 3 : 1.

Размеры слюды, согласно ОСТ—4264

№ слюды	Площадь вписанного прямоугольника в $см^2$
0000	490 —
000	350—450
00	310—390
0	280—310
1	155—230
2	90—155
3	65— 90
4	40— 65
5	20— 40
6	10— 20
7	6— 10

Колотая слюда служит исходным материалом для производства различных сортов слюды: очищенной, полуочищенной, щипаной, конденсаторной, обрезной; из колотой слюды изготовляются и фасонные слюдяные изделия. Толщина пластин колотой слюды колеблется от 0,2 до 2—3 *мм*.

Очищенной слюдой называют пластины слюды, края которых обрезаны по всему контуру для полного удаления дефектных частей. Толщина пластин колеблется от 0,2 до 2—3 *мм*. Очищенная слюда применяется для производства щипаной слюды для микафолия и гибкого миканита.

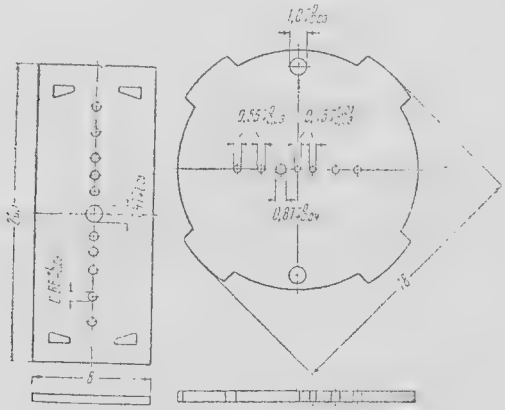


Рис. 167. Типовая внутриламповая изоляция из слюды.

Полуочищенной слюдой называют пластины колотой слюды, края которых дополнительно обработаны на машинах или вручную. Полуочищенная слюда применяется для производства щипаной слюды для микафолия и формовочного и гибкого миканитов.

Щипаной слюдой называют тонкие, толщиной от 0,015 *мм* до 0,025—0,04 *мм*, пластинки слюды, полученные в результате расщипки колотой, очищенной, или полуочищенной слюды. Щипаная слюда применяется для производства микафолия, микаленты и миканита.

Обрезной слюдой называются прямоугольные пластины, вырезанные из колотой слюды. Обрезная слюда применяется для изоляции зажигательных свечей, для изоляции щеткодержателей и т. д.

На рис. 167 приведены чертежи типовых внутриламповых изоляторов, полученных путем штамповки обрезной слюды.

Калиброванная по толщине обрезная слюда-мусковит носит название конденсаторной слюды.

В зависимости от степени чистоты поверхности, расщепляемости и электрических свойств слюда-мусковит разделяется на пять сортов, флогопит—на три сорта.

Первый сорт мусковита представляет собой чистую слюду без пятен, совершенно ровную.

Второй сорт—слабо пятнистая слюда, с площадью пятен не более 10% общей площади пластинки, с ровной поверхностью.

Третий сорт—пятнистость 25% от общей площади и небольшая волнистость.

Четвертый сорт характеризуется пятнистостью до 50%, допускается волнистость.

Пятый сорт представляет сильно пятнистую и сильно волнистую слюду.

Первый сорт флогопита отличается ровной поверхностью пластин.

Второй сорт представляет слабо волнистую или морщинистую слюду.

Третий сорт—сильно волнистая или морщинистая слюда.

Обработка слюды производится, главным образом, вручную и является очень трудоемкой. Например, на расщипку 1 *кг* слюды до толщины в 0,025 *мм* (7-го номера), производимую при помощи тонкого ножа, требуется около двух человеко-дней.

По своим основным свойствам слюды мусковит и флогопит значительно отличаются друг от друга.

Электрические и физические свойства слюды

Свойства	Мусковит	Флогопит
Удельный вес	2,8—3,0	2,78—2,85
Твердость по шкале Мооса	2,8—3,2	2,5 — 2,7
Рабочая температура в °С	500—600	900—1000
Диэлектрическая проницаемость	6—7	5—6
Диэлектрические потери при $f=1 \cdot 10^6$ *гц* ($tg\delta$). .	0,0001—0,0003	0,001—0,005
Удельное объемное сопротивление (в *ом · см*) при $t=20°$	10^{15}—10^{16}	10^{13}—10^{14}

Флогопит более гибок, чем мусковит, но более хрупок. В химическом отношении мусковит более стоек, чем флогопит. Мусковит противостоит действию серной и азотной кислоты. Флогопит поддается действию серной кислоты.

Слюда прекрасно переносит резкие изменения температуры и поэтому с успехом применяется в нагревательных приборах, зажигательных свечах, в электронных лампах и т. д.

Слюда гигроскопична, что обусловлено ее слоистой структурой. Влага распределяется, главным образом, по плоскостям спайности.

Электрические свойства слюды зависят от степени влажности ее. Особенно сильно изменяются с увлажнением диэлектрические потери при низкой частоте. Например, при $f = 50$ *гц* tgδ мусковита в нормальных условиях равен 0,040; после сушки—0,001.

Наличие влаги в слюде обусловливает низкое значение сопротивления слюды вдоль слоев. Удельное объемное сопротивление слюды вдоль слоев составляет 10^9—10^8 *ом · см*.

Таблица 26

Диэлектрические потери и объемное сопротивление слюды-мусковит

$t°$ C	tgδ при $f=50$ *гц*	Уд. объемн. сопротивл. при пост. токе (*ом · см*)	Уд. объемн. сопротивл. вычисл. по tgδ при $f=50$ *гц* (*ом · см*)	ε	tgδ при $\lambda=210$ *м*
13	$6 \cdot 10^{-4}$	$>10^{14}$	$9{,}2 \cdot 10^{12}$	6,50	$3 \cdot 10^{-4}$
56	$30 \cdot 10^{-4}$	—	$1{,}8 \cdot 10^{12}$	6,54	„
95	$80 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{13}$	$6{,}9 \cdot 10^{11}$	—	„
105	$95 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{13}$	$5{,}8 \cdot 10^{11}$	—	„
152	$228 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{12}$	$2{,}4 \cdot 10^{11}$	6,60	„
202	$504 \cdot 10^{-4}$	—	$1{,}0 \cdot 10^{11}$	6,80	„
210	$627 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{11}$	$8{,}4 \cdot 10^{10}$	6,80	„
267	$1595 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{10}$	$3{,}0 \cdot 10^{10}$	7,60	„
292	$2670 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{10}$	$1{,}7 \cdot 10^{10}$	7,63	„
315	$4080 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{10}$	$1{,}1 \cdot 10^{10}$	8,05	„
347	$7360 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{9}$	$5{,}8 \cdot 10^{9}$	8,44	„

При изготовлении качественных слюдяных конденсаторов слюду высушивают, изделия тщательно заливают изолирующими составами (компаундами) и герметически заделывают в кожух для предохранения от влаги.

В таблице 26 представлены значения угла потерь, диэлектрической проницаемости и объемного сопротивления слюды-мусковит (карельской, прозрачной), тщательно высушеной заранее при разных температурах.

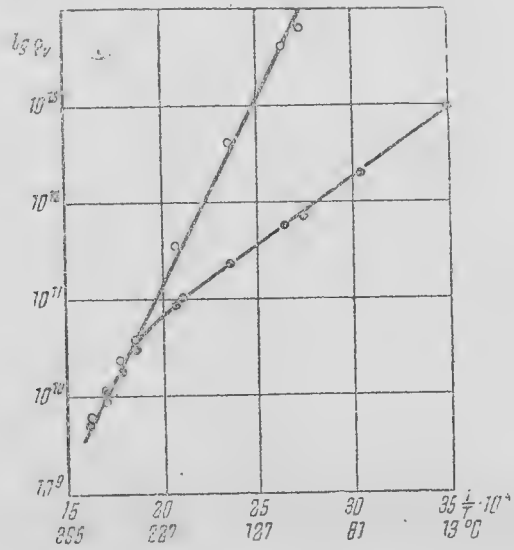


Рис. 168. Зависимость удельного объемного сопротивления слюды мусковит от температуры.
●—ρ — вычисленное по tgδ, при f=50 *гц*;
○—ρ — измеренное на постоянном токе.

Коэфициент B в формуле для зависимости сопротивления слюды составляет 8200. На рис. 168 показана зависимость объемного сопротивления от температуры при постоянном токе и вычисленная по tgδ при $f = 50$ *гц*.

Изменение активного сопротивления при переменном токе до температуры около 300° подчиняется этому же закону, но коэфициент имеет значительно меньшую величину и равен 3100.

Наличие в слюде включений в виде пятен часто сказывается на величине угла потерь.

В таблице 26а приведены электрические свойства некоторых слюд союзных месторождений.

Таблица 26а

Электрические свойства слюд союзных месторождений

Сорт слюды	tgδ при $f=2\cdot10^6$ гц	Диэлектр. проницаемость	Удельное объемное сопротивление (ом · см)
Карельский прозрачный мусковит	$<3\cdot10^{-4}$	7,0	$1\cdot10^{15}$
Карельский серебристый мусковит . . .	$<3\cdot10^{-4}$	7,0	$4\cdot10^{14}$
Карельский мусковит с черными пятнами .	до $5\cdot10^{-2}$	7—7,3	$1\cdot10^{14}$
Карельский мусковит с рыжими пятнами . .	$6\cdot10^{-4}$	6,5—6,8	$2\cdot10^{14}$
Кыштымский мусковит (зеленый)	$3\cdot10^{-4}$—$2\cdot10^{-3}$	6—7,2	10^{12}—10^{13}
Мариупольский мусковит пятнистый . . .	$6\cdot10^{-4}$	6,5—7,2	10^{15}—10^{16}
Тединский мусковит бледнорозовый . . .	$<3\cdot10^{-4}$	6,7	$1\cdot10^{15}$
Золотистый флогопит .	$5\cdot10^{-3}$	5,4	$5\cdot10^{12}$
Дымчатый флогопит . .	$2\cdot10^{-3}$	6,2	$1\cdot10^{13}$
Серебристый флогопит	$3\cdot10^{-3}$	2,0	$4\cdot10^{13}$
Янтарный флогопит . .	$8\cdot10^{-4}$	6,5	$2\cdot10^{14}$

На рис. 169 показана зависимость tgδ от температуры при технической и при высокой частотах.

Пробивное напряжение слюды при технической частоте велико. Средняя пробивная напряженность при наличии краевого эффекта уменьшается с увеличением толщины. При сглаженном краевом эффекте пробивная напряженность слюды мало зависит от толщины и имеет большое значение.

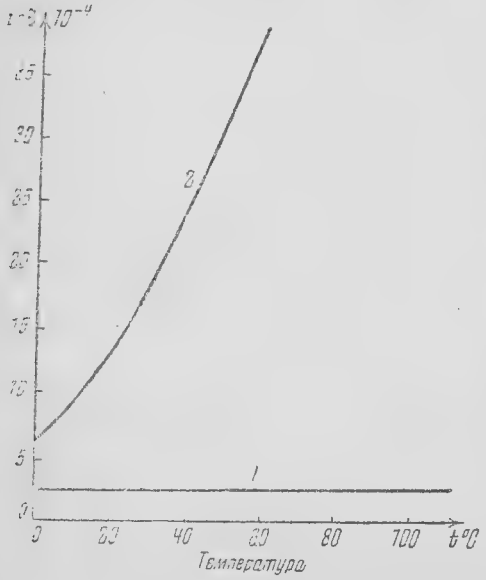


Рис. 169. Зависимость tgδ слюды мусковит от температуры.
1—$f=2 \cdot 10^6$ *гц*;
2—$f=50$ *гц*.

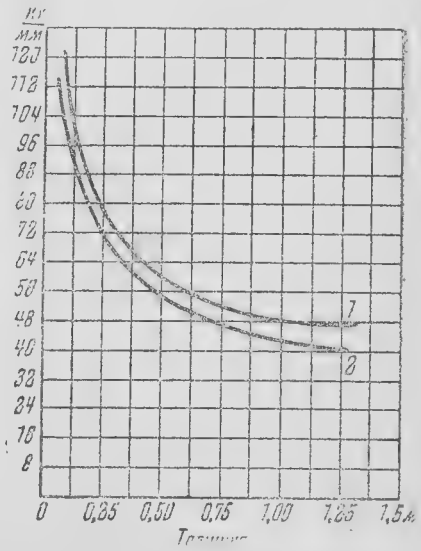


Рис. 170. Электрическая прочность слюды в зависимости от толщины.
1—мусковит в воздухе;
2—мусковит в масле.

При пробое слюды в масле, благодаря резко выраженному краевому эффекту, пробивная напряженность меньше, чем при пробое слюды в воздухе или в среде с большой проводимостью, например, в анилине.

Пробивная напряженность слюды в однородном поле достигает 1 000—2 000 *кв/см* (рис. 170). Однако при высоких частотах величина допустимого рабочего напряжения на слюдяную пластинку толщиной 40—50μ составляет всего 250—300 *в* (~50 *кв/см*). Такое низкое значение величины рабочей напряженности объясняется, как указывалось выше, сильно выраженным краевым эффектом при радиочастотах (явление короны), с одной стороны, и возможным нагревом самой слюды вследствие диэлектрических потерь, с другой стороны.

Для высоковольтных высокочастотных конденсаторов, где имеют большое значение диэлектрические потери, мо-

жет применяться конденсаторная слюда-мусковит только первого сорта. Для конденсаторов приемной радиоаппаратуры допускаются более низкие сорта слюды мусковит.

Для обеспечения высокого постоянства величины емкости слюдяного конденсатора, в особенности при изменениях температуры, технологический процесс изготовления конденсатора должен быть соблюден очень тщательно. Большое значение имеет метод нанесения электродов. Хорошие результаты получаются при серебряных электродах, нанесенных испарением в вакууме, или вжиганием. Существенно также предохранить предварительно высушенный слюдяной конденсатор от дальнейшего действия влаги.

§ 85. Кристаллический кварц

Кристаллический кварц находит применение в электротехнике лишь для специальных целей, где используются его пьезо-электрические свойства: как стабилизатор колебаний высокой частоты, для эталонов частоты и как ультраакустический излучатель. В очень ограниченном размере кварц идет для изготовления изоляторов к точным воздушным конденсаторам переменной емкости. Ввиду большой твердости кварца пластинки из него вырезают с помощью алмазных пил.

Чистый кварц SiO_2 находится в природе в прекрасно образованных кристаллах, имеющих вид шестигранных призм, увенчанных пирамидой самой разнообразной величины, иногда достигающих очень больших размеров.

Бесцветный прозрачный кристалл кварца называется горным хрусталем. Кристаллический кварц, окрашенный в различные цвета содержащимися в нем примесями, носит разные названия, например, аметист (фиолетового оттенка), раухтопаз и др.

Кремнезем образует семь отдельных кристаллических модификаций: α и β кварц, α, β и γ тридимит, α и β кристобаллит.

Приводим температуры превращений и удельные веса кремнезема.

Модификация кремнезема

Модификация	Удельный вес	Устойчивость при норм. атмосферн. давлении
α-кварц	2,65	от 575 до 870°
β-кварц	2,60	ниже 575°
α-тридимит	—	от 870 до 1480°
β-тридимит	—	от 117 до 163°
γ-тридимит	2,28	до 117°
α-кристобаллит	2,21	1480° – 1713°
β-кристобаллит	2,33	до 220 – 275°
Кварцевое стекло . . .	2,21	свыше 1 713°—плавится свыше 1 000°—расстекловывается

На рис. 171 показана одна из распространенных форм кристаллического кварца (*а*) и схематическое ее изображение (*б*). Линия, проходящая через вершины кристалла, называется главной или оптической осью кристалла. Линии, перпендикулярные оптической оси и соединяющие противоположные ребра призмы, называются электрическими осями.

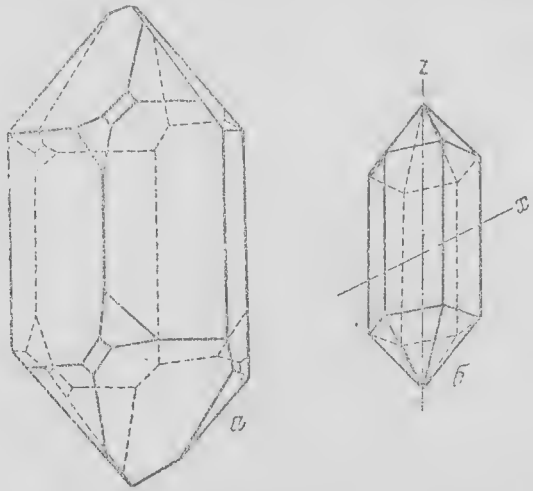


Рис. 171. Распространенная форма кристаллического кварца.
а — кристалл кварца;
б — схематическое изображение.

Линии, лежащие в плоскости, перпендикулярной оптической оси, и перпендикулярные электрическим осям, называются механическими осями кристалла.

Физические и электрические свойства кристаллического кварца при $t=20°C$ приведены ниже.

Физические и электрические свойства кристаллического кварца

Свойства	Параллельно оптической оси	Перпендикулярно оптической оси
Диэлектрическая проницаемость (ε) . .	4,5	3,8
Диэлектрические потери (tgδ)		
при $f=50$ *гц*	0,0022	0,0007
при $f=2\cdot10^6$ *гц*	$<3\cdot10^{-4}$	$<3\cdot10^{-4}$
Удельное объемное сопротивлен. (*ом см*)	$1\cdot10^{14}$	$2\cdot10^{16}$
Коэфициент линейного расширения . . .	$7{,}5\cdot10^{-6}$	$13{,}7\cdot10^{-6}$
Коэфициент теплопроводности $\left(\frac{кал.}{°C\ см\ сек}\right)$	0,032	0,017
Твердость по шкале Мооса	—	7

Физические свойства кристаллического кварца различны в разных направлениях в отношении оптической оси.

Электрические свойства в направлении вдоль оптической оси резко снижены сравнительно с перпендикулярными к ней направлениями.

В таблицах 27 и 28 приведены температурные зависимости электрических свойств кристаллического кварца, для направлений вдоль и перпендикулярно оптической оси.

Таблица 27

Диэлектрические потери и проводимость кварца параллельно оси

t°C	tgδ при $f=50$ гц	ε	Уд. объемное сопротивление по постоянному току ом · см	t°C	tgδ при $f=2\cdot10^6$ гц	Уд. объемн. сопротивл. постоян. току ом · см
16	0,0022	4,5	$5\cdot10^{13}$	16	$3\cdot10^{-4}$	—
58	0,0026	4,5	$5\cdot10^{13}$	50	$3\cdot10^{-4}$	—
81	0,0049	4,5	$1,5\cdot10^{13}$	74	$3\cdot10^{-4}$	—
99	0,0114	4,5	$2,8\cdot10^{12}$	134	$3\cdot10^{-4}$	—
100	0,0109	4,5	$2,8\cdot10^{12}$	194	$3\cdot10^{-4}$	$8\cdot10^{9}$
133	0,0897	4,7	$2,6\cdot10^{11}$	230	$3\cdot10^{-4}$	$2,5\cdot10^{9}$
151	0,260	4,8	$1,2\cdot10^{11}$	255	—	$1,0\cdot10^{9}$
152	0,300	4,9	$8,3\cdot10^{10}$	258	0,001	—
175	1,700	—	$1,7\cdot10^{10}$	294	0,003	—
—	—	—	—	308	—	$2,2\cdot10^{8}$
—	—	—	—	318	0,010	$8,0\cdot10^{7}$

Таблица 28

Диэлектрические потери и проводимость кварца перпендикулярно оси в зависимости от температуры

t°C	tgδ при $f=50$ гц	Уд. объемн. сопротивл. постоян. току ом · см	ε	t°C	tgδ при $f=2\cdot10^6$ гц
14	0,0007	$>1,7\cdot10^{13}$	—	86	$\sim7\cdot10^{-4}$
71	0,0009	$>1,7\cdot10^{13}$	—	136	$\sim7\cdot10^{-4}$
102	0,0010	$>1,7\cdot10^{13}$	—	156	$\sim7\cdot10^{-4}$
144	0,0016	$>1,7\cdot10^{13}$	3,80	172	$\sim7\cdot10^{-4}$
154	0,0030	$>1,7\cdot10^{13}$	3,87	200	$\sim7\cdot10^{-4}$
192	0,0210	$>1,7\cdot10^{13}$	3,90	221	$\sim7\cdot10^{-4}$
196,5	0,0246	$>1,7\cdot10^{13}$	3,95	300	$\sim7\cdot10^{-4}$
256	0,3866	$9,3\cdot10^{11}$	4,40	—	—
300	—	$1,4\cdot10^{11}$	—	—	—
330	0,9100	$4,0\cdot10^{11}$	—	—	—

На рис. 172 и 173 сопоставлены электрические свойства кристаллического кварца со свойствами плавленого кварца.

Пластинки из пьезокварца должны отличаться значительной механической прочностью, особенно при использовании их для стабилизации генераторов повышенной мощности или рассчитанных на очень высокие частоты, когда необходимо получить очень малую толщину пластинки. Для стабилизации ультракоротких волн применяются другие пьезоэлектрические кристаллы с более высокими механическими свойствами, чем у кварца, например, турмалин.

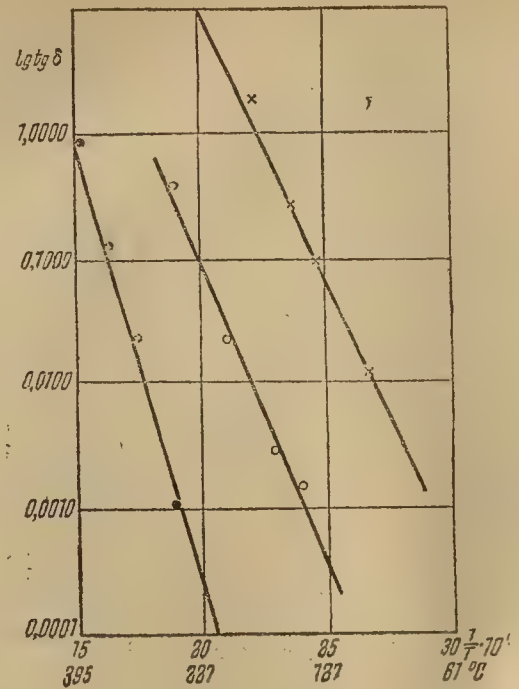


Рис. 172. Зависимость tgδ при f = 50 *гц* от температуры для кристаллического и аморфного кварца.
• — аморфный кварц; o — кварц перпендикулярно оси; × — кварц параллельно оси.

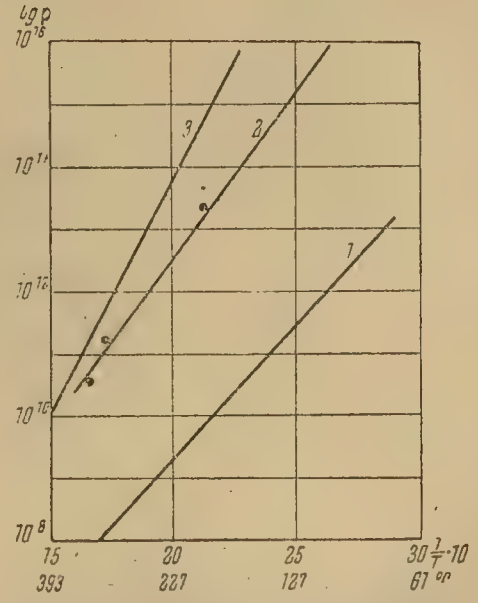


Рис. 173. Зависимость удельного объемного сопротивления кристаллического и плавленого кварца от температуры.
1—параллельно оси;
2—перпендикулярно оси;
3—плавленый кварц.

ЧАСТЬ IV

ПРИМЕНЕНИЕ КЕРАМИКИ В ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ АППАРАТУРЕ

ВВЕДЕНИЕ

Радиодетали в зависимости от назначения разделяются на следующие группы.

1. Установочные детали. Эту группу составляют ламповые панели, платы переключателей диапазона, колодки, цоколи, втулки, бусы, опорные и проходные изоляторы, антенные изоляторы и другие.

2. Катушки индуктивности. Сюда входят катушки постоянной индуктивности, катушки со ступенчатым включением отдельных секций (с отводами или щупами) и, наконец, катушки, допускающие плавное изменение индуктивности путем перемещения контактного ролика, вращением ротора вариометра или перемещением магнитного сердечника.

3. Конденсаторы. Эту группу составляют низковольтные конденсаторы и высоковольтные большой реактивной мощности. Низковольтные конденсаторы различаются по величине *ТКЕ*, изготовляются постоянной емкости и подстроечные (триммеры)—переменной емкости. Высоковольтные конденсаторы различаются по величинам напряжения и реактивной мощности.

4. Сопротивления. Различают проволочные сопротивления и непроволочные. Последние бывают поверхностные и объемные.

Во всех случаях керамика используется как основа или является токопроводящим элементом (керамика сопротивлений).

Помимо названных четырех групп радиодеталей, элементами колебательных контуров являются вакуумные приборы, измерительные приборы и др. И здесь керамика находит применение, например, как изоляция внутри электронных ламп, металлокерамических ламп дециметрового диапазона, изоляция в измерительных приборах.

Глава XIX

УСТАНОВОЧНЫЕ ДЕТАЛИ ИЗ РАДИОКЕРАМИКИ

§ 86. Общие замечания

Выбор диэлектрика для установочных деталей радиоустройства малой мощности в большинстве случаев не предопределяется его диэлектрическими потерями (если tgδ не

выше 0,003—0,004), но зависит от стабильности электрических свойств, в особенности, емкости, от механической прочности, требуемой точности размеров, тепловых характеристик.

Наоборот, для мощных радиоустройств диэлектрические потери материала в значительной мере сказываются на

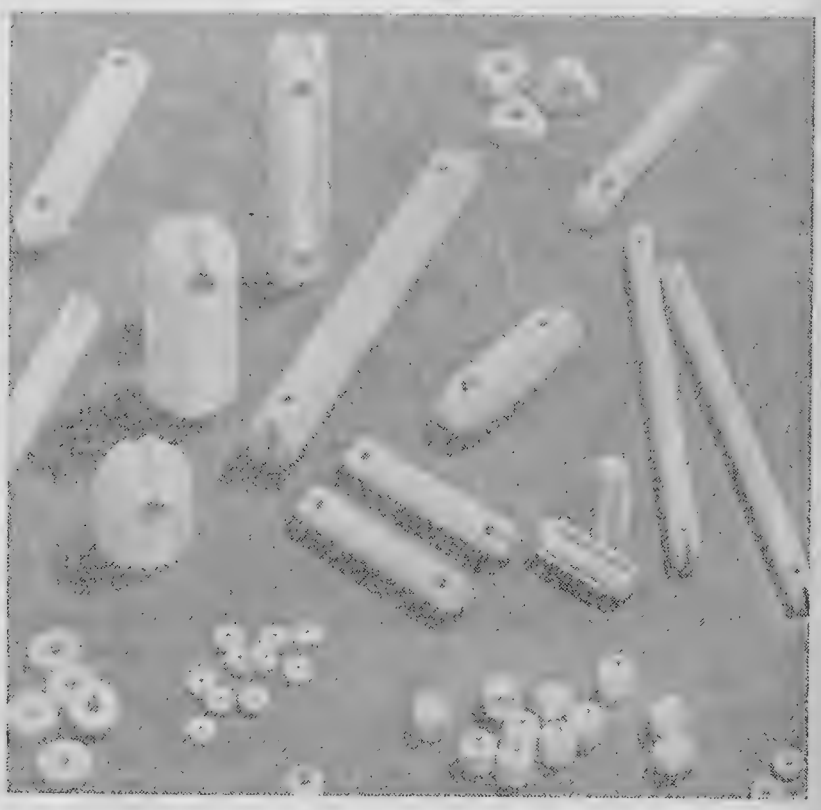


Рис. 174. Антенные изоляторы и бусы.

размерах и конструкции установочных изоляторов, в особенности при коротких и ультракоротких волнах. В общем случае установочные материалы должны иметь малое значение диэлектрической проницаемости при малых диэлектрических потерях. Это требование обусловливается стремлением уменьшить паразитные емкости и влияние диэлектрика на величину активного сопротивления колебательного контура. В высоковольтных высокочастотных

устройствах размеры изолятора в значительной мере зависят от „коэфициента потерь", т. е. от произведения $\varepsilon \cdot \operatorname{tg}\delta$. Температура нагрева изолятора, определяемая диэлектрическими потерями, прямо пропорциональна произведению из ε и $\operatorname{tg}\delta$. Необходимо, чтобы возрастание диэлектрических потерь изолятора с температурой было бы незначительным.

Для установочных деталей, наряду с высокими электрическими свойствами, приобретает особенное значение механическая прочность материала и термическая стойкость. Желательно, чтобы материал отличался малым удельным весом. Большое значение для установочных деталей имеет точность размеров.

§ 87. Конструкции установочных изоляторов

Установочные изоляторы можно классифицировать согласно их назначению:

1) антенные изоляторы и бусы;

2) опорные изоляторы разной конфигурации и размеров;

3) проходные изоляторы и втулки;

4) платы, панели, колодки, крестовины, кольца.

На рис. 174 показаны изоляторы первой группы. Чертеж антенного изолятора, фотография которого показана на рис. 90, приведен на рис. 175. Разрушающие нагрузки таких изоляторов из разных материалов, испытанных с арматурой в виде металлических головок с ушками, укрепленными на изоляторе с помощью глиноземистого или глет-глицеринового цементов, составляют:

Радиофарфор . . .	> 1500 *кг*
Ультрафарфор . .	> 2500 *кг*
Алюминоксид . .	> 3500 *кг*

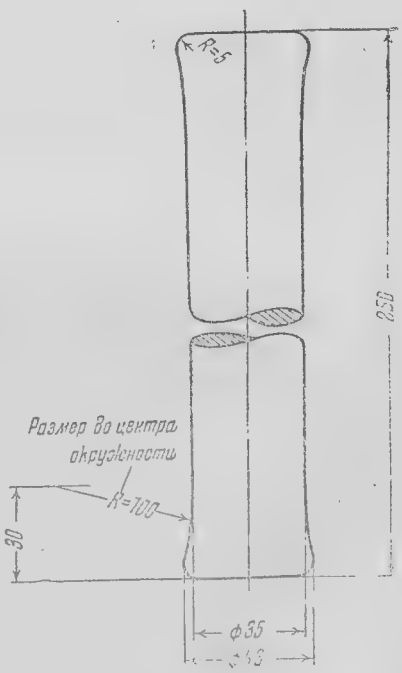


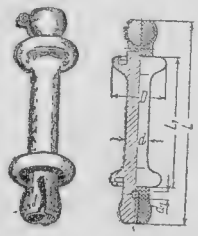
Рис. 175. Стержневой антенный изолятор.

В таблицах 29 и 30 показаны новые конструкции антенных изоляторов для внутренних помещений и наружных установок согласно литературным данным.

Опорные изоляторы изготовляются конической формы, ребристые, цилиндрические, прямоугольные и специальной конфигурации для высоких напряжений.

Таблица 29

Антенные изоляторы высокого напряжения для внутренних устройств

Чертежи изоляторов	№ [illegible]	Характеристика				Размеры в мм				
		[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	L	L_1	D	d	d_1
	1	15	30	1	150	102	60	34	12	4
	2	25	50	1,5	300	158	100	40	18	5
	3	30	60	2,5	600	220	140	60	25	7
	4	40	80	5	1500	348	224	90	40	10

Высокими значениями рабочих напряжений характеризуются изоляторы боченочного типа, показанные в таблице 31, изготовленные из ультрафарфора и радиостеатита.

Боченочный тип изоляторов из радиофарфора для открытых устройств, рассчитанный на большие механические усилия, когда требуется тщательная шлифовка торцовых поверхностей, представлен в таблицах 31 и 32. Относительно невысокие рабочие напряжения таких изоляторов обусловлены отсутствием электрической экранировки и мокрым разрядом.

В таблице 33 и на рис. 176 показаны опорные изоляторы разных конструкций.

Проходные изоляторы и втулки представлены на рисунках 177—179. Высоковольтные проходные изоляторы показаны в таблице 34.

Изоляторы разного назначения, выполненные из радиокерамики, показаны на рисунках 180 и 181.

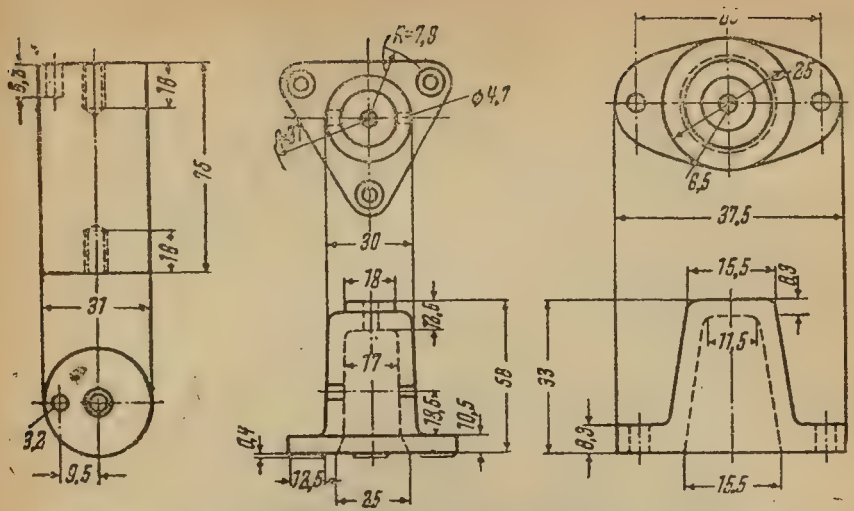


Рис. 176. Типовые опорные изоляторы.

Рис. 177. Проходные изоляторы и втулки.

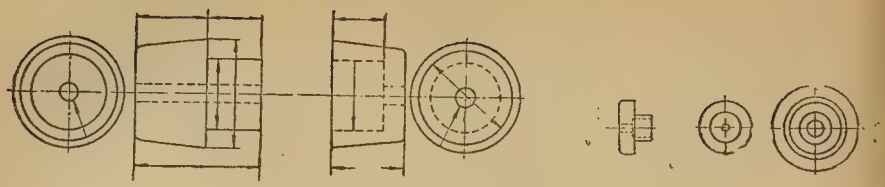


Рис. 178. Керамические втулки.

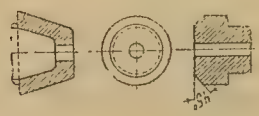


Рис. 179. Керамические втулки

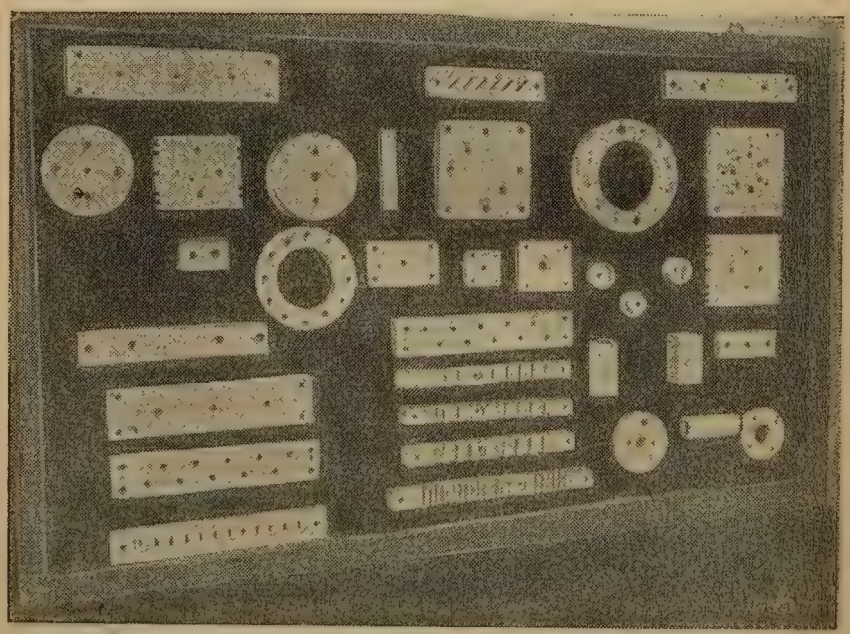


Рис. 180. Детали из радиокерамики для разных назначений.

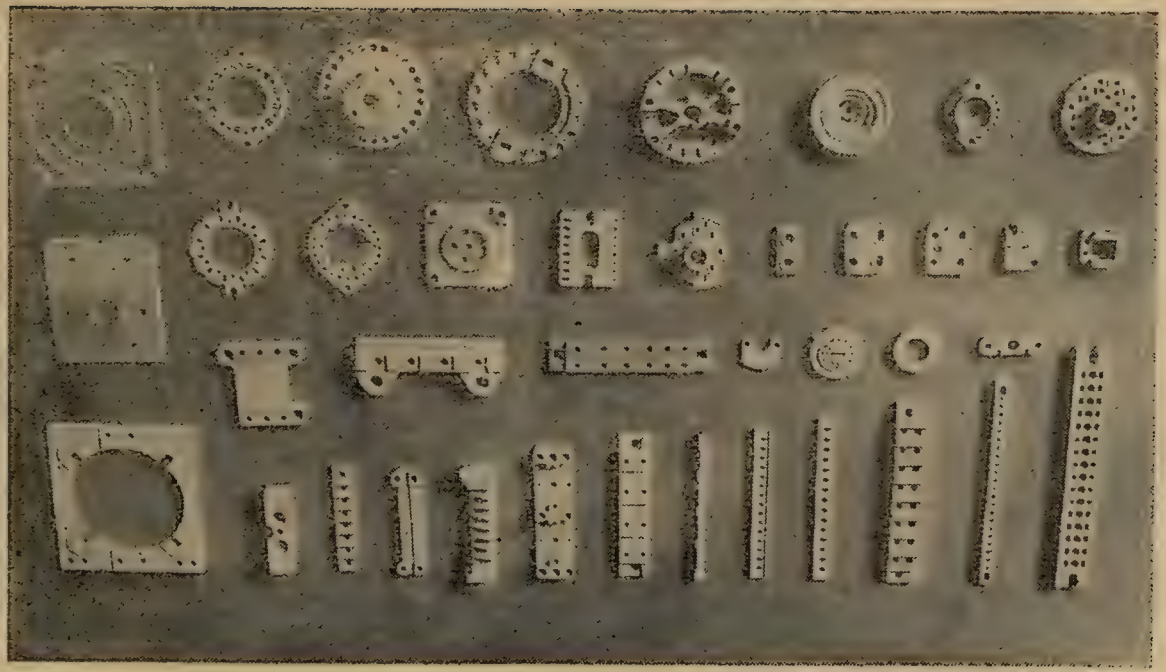


Рис. 181. Керамические детали для разных назначений.

Таблица 30

Антенные изоляторы высокого напряжения для наружных устройств

Чертеж изолятора	№ изолятора	Характеристики				Размеры в мм				
		Рабочее напряжение при f до 1 MHZ (в открытых условиях) в kV	Испытательное напряжение при f=50 гц под дождем 3 мин/мин в kV	Емкость изолятора в pF	Разрушающая нагрузка в кг	L	L_1	D	d	d_1
	1	5	10	1,5	300	158	100	40	18	5
	2	10	20	3,5	600	220	140	60	25	7
	3	15	[illegible]	5	1500	348	224	90	40	10

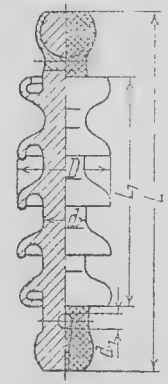


Таблица 31

Опорные изоляторы боченочного типа для высоких напряжений высокой частоты

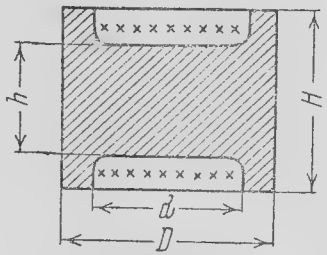
Чертеж изолятора	Характеристика / № изолятора	Размеры в мм				Рабочее напряжение высокой частоты Ueff в KV	Емкость в μF	Испытательн. напряжение при f=50 гц Ueff в KV
		D	d	H	h			
 × × × × × Металлизовать	1	20	15	15	10	7,0	~1,0	12
	2	30	20	20	12	10.0	~3.0	20

Таблица 32

Опорные изоляторы из радиофарфора для больших механических нагрузок

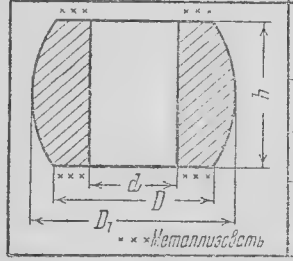
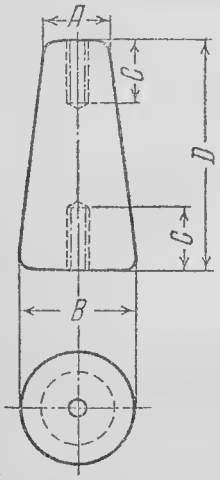
Чертеж изолятора	Характеристики / №№ изоляторов	Размеры: D_1	D	d	h	Рабочее напряжение высокой частоты Ueff в KV	Реактивная мощность Q_p при $f = 10^6$ гц KVA	Разрушающая нагрузка при сжатии в тонн	Удельная нагрузка при разрушении в кг/см²	Вес в кг	Емкость в μF
	1	220	200	140	150	6,0	1,4	200	1310	6,0	6
	2	240	230	150	150	6,0	2,1	250	1040	9,0	9
	3	300	310	250	270	12,0	4,7	200	835	16,0	5
	4	335	330	250	270	12,0	5,3	250	930	19,0	5,5

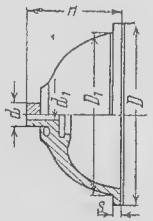
Таблица 33

Опорные конические изоляторы

Чертеж изолятора	№ изолятора	Размеры в мм			
		D	A	B	C
	1	25	12,5	25	9,5
	2	37,5	12,5	25	9,5
	3	75	36,5	37,5	9,5

Высоковольтные проходные изоляторы

Таблица 34

Чертежи изоляторов	№ изолятора	Характеристики			Размеры в мм					
		Рабочее напряжение при f до 1 MHZ в KV	Испытательное напряжение при f=50 HZ в KV	Емкость изолятора f μF	H	D	D_1	d	d	S
	1	12,5	25	3,5	55	108	95	13	7	5
	2	17,5	35	5	80	160	144	20	11	6
	3	25	50	8	120	223	203	26	13	8
	4	32,5	65	11	200	342	311	34	17,5	13

Глава XX

КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ

§ 88. Общие замечания

Катушки индуктивности отличаются по величинам самоиндукции, добротности, ТКИ, цикличности при изменении температуры и влажности, по величине рабочего напряжения и по силе тока.

Применение керамики для изготовления каркасов катушек индуктивности имеет особое значение, когда требуется высокая стабильность параметров катушки.

Стабильность катушки определяется коэфициентами линейного расширения материала каркаса и провода, отсутствием остаточных деформаций материала каркаса, температурным коэфициентом диэлектрической проницаемости каркаса, а также способом нанесения обмотки.

Лучшие результаты по температурному коэфициенту индуктивности дает применение горячей намотки провода на сплошной каркас, и особенно хорошими данными отличаются катушки с металлическим слоем, нанесенным на каркас методом вжигания. Такие катушки обычно выполняются на индуктивность 1—100 μH

Катушки с обмоткой, нанесенной вжиганием серебра, имеют температурный коэфициент эффективной индуктивности больше коэфициента расширения материала из-за положительного температурного коэфициента собственной емкости катушки, что видно из формулы:

$$\alpha_{L\text{эфф}} = \frac{\alpha_L + \omega^2 L C_0 \alpha_c}{1 - \omega^2 L C_0} = \frac{\alpha_L + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \alpha_c}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2},$$

где α_L —температурный коэфициент самоиндукции,

α_c —температурный коэфициент емкости катушки,

C_0 —собственная емкость катушки,

ω_0 —собственная частота катушки.

Добротность катушек при данной частоте зависит от активного сопротивления обмотки, от конструкции катушки и от диэлектрических потерь материала каркаса. Добротность катушек, от которых не требуется высокая стабильность, может быть повышена за счет применения литцендрата и магнитного сердечника.

Практически диэлектрические потери каркаса сказываются на значении добротности катушки лишь при очень большом значении tgδ (более 0,004).

В катушках на очень короткие волны условия распространения тока приводят к необходимости применения металлического слоя, определенной толщины, с тем, чтобы добротность катушки не была слишком низкой.

§ 89. Конструкции катушек индуктивности

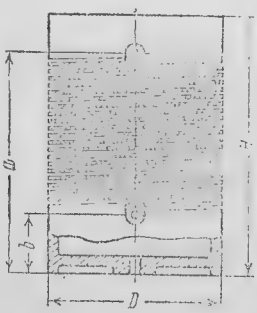
Характеристики высококачественных катушек индуктивности, изготовленных из стеатитовой кордиеритовой керамики с серебряной обмоткой, нанесенной вжиганием, приведены в таблицах 35 и 36 (по литературным данным).

Таблица 35

№ катушки	Индуктивн. в μH	Добротность		Сопротивление в омах		Температурный коэфициент индуктивности		Частота *мггц*
		стеатит	кордиерит	стеатит	кордиерит	стеатит	кордиерит	
1	10	181	194	0,23	0,28	$+15 \cdot 10^{-6}$	$+13 \cdot 10^{-6}$	4,3
2	20	200	208	0,32	0,40	$+18,5 \cdot 10^{-6}$	$+17 \cdot 10^{-6}$	3,0
3	10	300	256	0,15	0,15	$+13 \cdot 10^{-6}$	$+10 \cdot 10^{-6}$	4,5
4	20	318	300	0,16	0,18	$+17,5 \cdot 10^{-6}$	$+21 \cdot 10^{-6}$	4,3

Таблица 36

Катушка индуктивности с обмоткой, нанесенной вжиганием



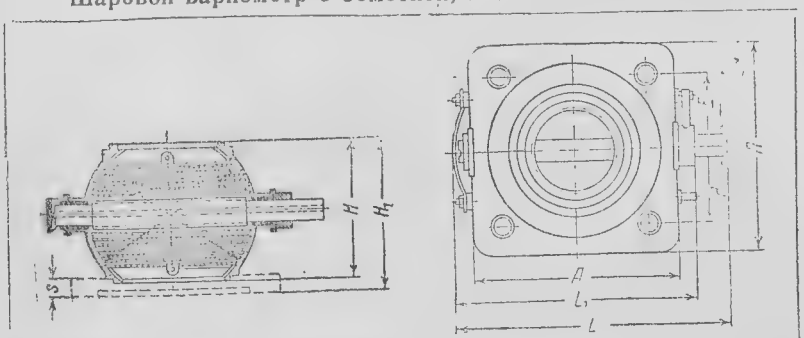
Чертеж катушки	№ катушки	Характеристики			Размеры в мм			
		L μH	Добротность		D	H	a	b
	1	10	1[illegible]0	70	30	61	56,3	15
	2	20	170	1[illegible]	45	66	56,3	15
	3	5[illegible]0	150	8[illegible]	90	205	194,[illegible]	15
	4	1000	150	1500	120	225	221,3	15
	Допуск по индуктивности ± 10 %							

Изготовление катушек индуктивности из кордиеритовой керамики с исключительно малым температурным коэфициентом линейного расширения не дает никаких преимуществ сравнительно с применением стеатита, повидимому, вследствие большого значения температурного коэфициента диэлектрической проницаемости кордиерита.

В таблице 37 приведены характеристики керамических шаровых вариометров по литературным данным, а на рисунках 182а, 182б и 182в показаны конструкции шаровых вариометров, выполненных из радиофарфора.

Таблица 37

Шаровой вариометр с обмоткой, нанесенной вжиганием



№ вариометра	Характеристики				Размеры в мм							
			Добротность									
	L min	L max	Q min	Q max	D	D_1	H	A	E	L	L_1	d
1	1,2	16	55 (при λ=80м)	150 (при λ=70м)	58	55	56	72	58	107,5	87,5	7
2	4	90	20 (при λ=35м)	100 (при λ=200м)	83	80	70	100	80	137	112,5	9

Из керамики изготовляются также каркасы катушек, на которые наматывается провод с органической изоляцией. Такие каркасы выполняются гладкими, с резьбой, с перегородками для секционированной обмотки, звездчатые для двуслойной намотки и каркасы с очень тонкой стенкой, предназначенные для катушек с высокочастотными магнитными сердечниками. Каркасы таких типов показаны на рис. 183а.

Для высоковольтных устройств, где возможно возникновение короны и дуги, керамические катушки (контурные, дроссели) имеют преимущества перед другими материалами по теплостойкости. На рис. 183б показана катушка мощного высокочастотного генератора на керамическом основании.

Рис. 182а. Вариометр с обмоткой, нанесенной вжиганием.

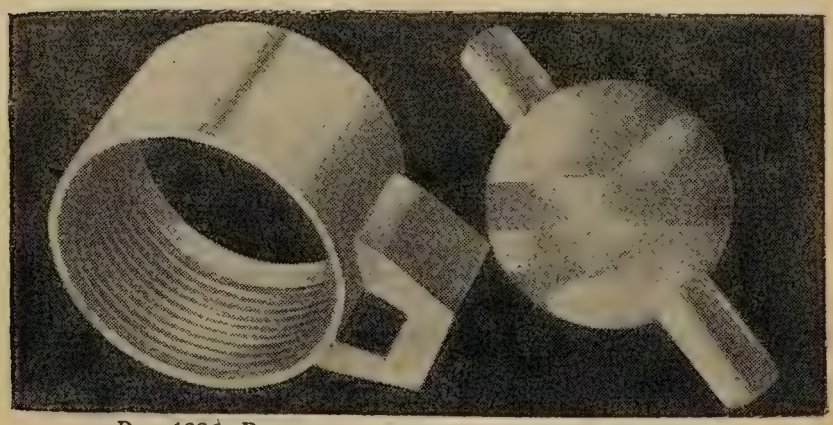


Рис. 182б. Вариометр с коротко-замкнутым ротором.

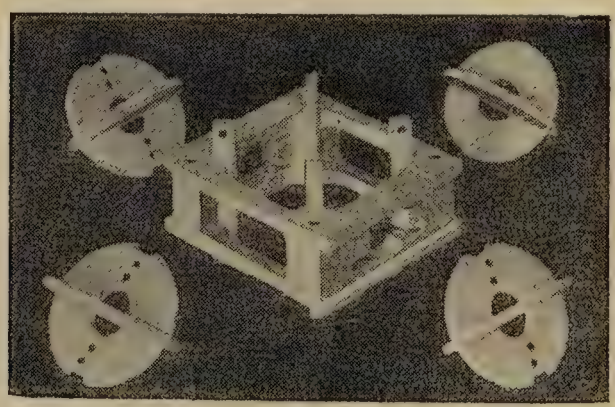


Рис. 182в. Детали для вариометра с обмоткой из проволоки.

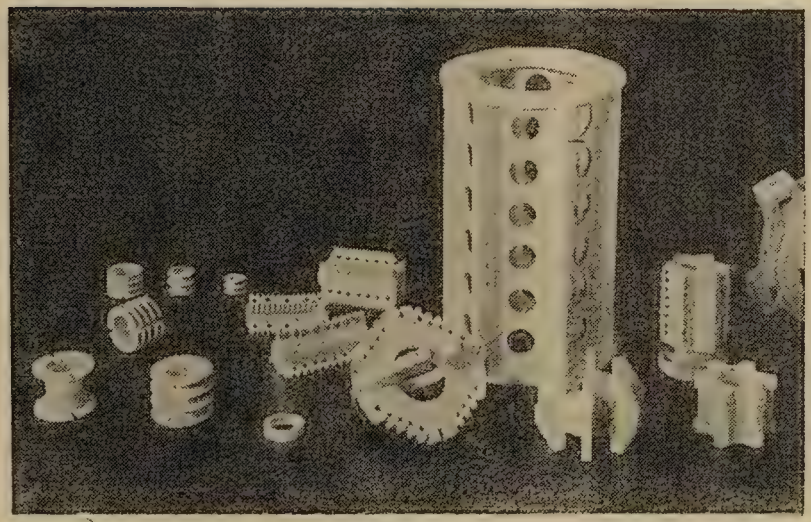


Рис. 183а. Керамические каркасы для катушек с проволочной намоткой.

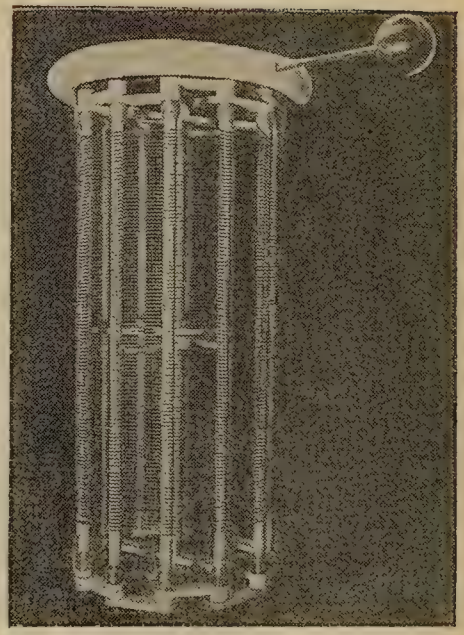


Рис. 183б. Катушка высоковольтного высокочастотного генератора на керамическом основании.

ГЛАВА XXI

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

§ 90. Общие замечания

Разнообразие электрических устройств, применяемых в промышленности, находит свое отражение в самых различных типах электрических конденсаторов. Характеристики конденсатора определяются не только электрическими свойствами диэлектрика, но и конструктивными возможностями его оформления, которые в свою очередь зависят от физических и механических свойств диэлектрика. Таким образом свойства диэлектрика предопределяют область применения данного конденсатора.

Нельзя указать ни одного изолирующего материала, который был бы универсальным как диэлектрик для любого типа конденсатора. Так например, пропитанная маслом бумага является лучшим диэлектриком для конденсаторов переменного высокого напряжения низкой частоты и постоянного высокого напряжения, и совершенно непригодна для конденсаторов высокой частоты. Электролитические конденсаторы наиболее выгодны для постоянного или пульсирующего напряжения до 500 *в* и т. д.

Классификацию электрических конденсаторов можно производить согласно их назначения, исходя из известных электрических режимов, а также по роду диэлектрика. Согласно первому признаку различают две основные группы конденсаторов:

1. Конденсаторы для постоянного и пульсирующего напряжений, переменного напряжения низкой частоты и импульсных напряжений.
2. Конденсаторы для высоких частот.

Каждая группа, в свою очередь, должна быть представлена многими типами конденсаторов, различающихся по величине рабочего напряжения, по реактивной мощности, по стабильности емкости при переменных действиях температуры и влажности, по сопротивлению изоляции (постоянной времени).

Каждый тип конденсатора, конечно, включает в себе целый ряд номиналов по емкости.

В первую группу входят конденсаторы для улучшения $\cos\varphi$, фильтровые конденсаторы, конденсаторы связи, для импульсных генераторов, конденсаторы для измерительной техники, искрогасительные конденсаторы, телефонные и др.

Высокочастотные конденсаторы разделяются на низковольтные (для радиоприемной аппаратуры, измерительных устройств, задающих каскадов генераторов и др.) и высоковольтные (для мощных генераторов, последних каскадов

радиопередатчиков, колебательных контуров высокочастотных печей и др.). Высоковольтные контурные, блокировочные и фидерные конденсаторы различаются не только по величине напряжения, приложенного к конденсатору, но и по величине реактивной мощности.

По роду диэлектрика конденсаторы разделяются на типы, приведенные в таблице 38. В таблице дана сравнительная оценка конденсаторов в зависимости от рода диэлектрика и отражено качество конденсаторов, освоенных в настоящее время в технике. Цифры, указанные в скобках, относятся к образцам, полученным в самое последнее время, и пока не получившим широкого распространения.

Сопоставляя классификацию конденсаторов по назначению с классификацией по роду диэлектрика, мы видим, что ряд материалов может быть использован только при постоянном напряжении и переменном напряжении низких частот. Сюда относятся бумажные и электролитические конденсаторы и стеклянные обычной конструкции. Остальные типы конденсаторов рассчитаны на применение преимущественно при высоких частотах.

Воздушные конденсаторы обычно представляют собой конденсаторы переменной емкости и используются в контурах высокой частоты и в измерительных устройствах.

Конденсаторы с газовым диэлектриком (элегаз, азот) и вакуумные в последнее время с успехом используются для очень мощных колебательных контуров высокой частоты. Они много меньше по размерам слюдяных конденсаторов при той же реактивной мощности, вследствие исчезающе малых диэлектрических потерь.

Стекло — один из первых материалов, примененных для электрических конденсаторов (лейденская банка), в настоящее время вновь приобретает практический интерес в связи с разработкой специальных конструкций стеклянных конденсаторов. Кварцевые конденсаторы едва ли являются перспективными из-за очень сложной технологии, которая всегда будет определять высокую стоимость их.

Электролитические конденсаторы применимы, в основном, для постоянного или пульсирующего напряжений. Конденсаторы эти особенно рациональны при низких напряжениях (до 500—550 *в*) ввиду их исключительно малых габаритов при больших емкостях, например, для выпрямительных устройств радиоприемной аппаратуры.

Конденсаторная бумага является главнейшим изолирующим материалом для конденсаторов на переменное напряжение низкой частоты и постоянное напряжение. Бумага в этом случае пропитывается жидким диэлектриком, трансформаторным маслом, соволом, касторовым маслом, которые

Таблица 38

Характеристики конденсаторов

№№ по пор.	Характеристика / Тип конденсаторов	Диэлектр. проницаемость материала	Диэлектрические потери (tgδ) при $t = 20°$		Температ. коэфиц. емкости	Допустимая рабочая температура	Наименьшая толщина диэлектрика в μ	Наибольшая емкость в $\mu\mu F$ в единице	Наименьшая емкость в $\mu\mu F$
			при $f = 50$ гц	при $f = 1 \cdot 10^6$ гц					
1	Воздушный	~1,0	$< 1 \cdot 10^{-4}$	$< 1 \cdot 10^{-4}$	$1—3 \cdot 10^{-5}$	70—80°	0,5	1000—10000	0,5
2	Конденсатор со сжатым газом и вакуумный	~1,0	$< 1 \cdot 10^{-4}$	$< 1 \cdot 10^{-4}$	$1—3 \cdot 10^{-5}$	70—80°	1—3	1000—10000 вакууми. 250	100 5
3	Стеклянный	5—9	$5—7 \cdot 10^{-4}$	$5—7 \cdot 10^{-4}$	$+1 \cdot 10^{-4}$	100°	0,5—1,0	10000—100000	100
4	Кварцевый	4	$\sim 1 \cdot 10^{-4}$	$\sim 1 \cdot 10^{-4}$	$+3 \cdot 10^{-5}$	100°	0,5	500	1,0
5	Бумажный	3,5—7,0	0,003	0,020	$1—10 \cdot 10^{-4}$	70(115°)	0,008	$100 \cdot 10^6$	100
6	Электролитический . .	9—10	0,02—0,20	—	$+5 \cdot 10^{-3}$	+60°	—	$20 \cdot 10^6—5000 \cdot 10^6$	$0,5 \cdot 10^6$
7	С органической пленкой (полистирольной)	2,7	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$-1 \cdot 10^{-4}$	60°	0,03	$5 \cdot 10^6 (20 \cdot 10^6)$	100
8	С жидким диэлектриком (лектронолом) . .	4,4	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$-2 \cdot 10^{-4}$	100°	2—3	10000	100
9	Серный	4,0	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$\pm 5 \cdot 10^{-5}$	80°	1,0	200	10
10	Слюдяной	7,0	$1—3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$+3 \cdot 10^{-5}$	100°	0,02	210^6	10
11	Керамический	7—100 (1000—10000)	$5—15 \cdot 10^{-4}$	$2—10 \cdot 10^{-4}$	от $+2 \cdot 10^{-4}$ до $-10 \cdot 10^{-4}$	100°	0,3 (0,2)	2000 (2000)	0,5

обеспечивают высокие пробивные и рабочие напряжения конденсатора. Бумажно-масляные конденсаторы имеют основное значение в схемах для улучшения $\cos\varphi$ при низких и высоких напряжениях. Такие конденсаторы широко используются также для постоянного и пульсирующего напряжений в высоковольтных устройствах, например, для выпрямительных установок мощных радиопередатчиков или в импульсных высокочастотных генераторах. Бумага, пропитанная такими твердыми составами, как парафин, церезин, галовакс, используется для конденсаторов постоянного или пульсирующего напряжения на не очень большие напряжения. Эти конденсаторы применяются в устройствах, где электролитические конденсаторы не отвечают техническим требованиям, например, по температурному интервалу, току утечки, рабочему напряжению (выше 550 *в*), или где электролитики не могут быть удачно использованы, например, при малых значениях емкостей, для искрогасительных конденсаторов в магнето, для блокировочных конденсаторов телефонных аппаратов и др. В самое последнее время в специальных высокочастотных устройствах получили применение малогабаритные бумажные конденсаторы с электродами не из фольги, а из металла, нанесенного на бумагу испарением в вакууме. Такие конденсаторы изготовляются герметизованными полностью и дают выигрыш по объему до трех раз сравнительно с обычными фольговыми бумажными конденсаторами при тех же напряжениях и емкостях.

Серные конденсаторы представляют собой новый вид конденсаторов, изготовление которых освоено только на очень небольшие емкости в единице.

Полистироловые конденсаторы являются в отдельных случаях заменителями слюдяных—низкого напряжения, где не требуется высокая теплостойкость и высокая стабильность.

Конденсаторы с жидким диэлектриком рекомендуются в иностранной технике. Для этой цели используется синтетическая жидкость лектронол с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon=4{,}4$, $\mathrm{tg}\delta\simeq 0{,}0002$ и температурой вспышки 180°. Такие конденсаторы установлены в высокочастотных печах, с применением водяного охлаждения, благодаря чему мощность в единице достигает 1500 *ква*.

Слюдяные конденсаторы могут быть получены в очень широком диапазоне по емкости. Однако по стоимости их применение оправдывается только там, где используются их очень высокие электрические свойства (малый угол потерь и стабильность), т. е. при радиочастотах и в измерительных схемах.

В течение долгого времени основным диэлектриком для высокочастотных конденсаторов являлась слюда-мусковит.

Существовало мнение, что при длинных волнах контурные конденсаторы со слюдой не имеют заменителя, экономически себя оправдывающего. Считалось, что керамические конденсаторы при больших длинах волн и низких напряжениях работают ненагруженными, и стоимость и размеры их получаются слишком большими. Такое положение было бы справедливо, если бы мощные колебательные цепи имели частоту менее 10 *кгц*. В действительности длины волн колебательных цепей, имеющих значение в промышленности, не превосходят 3000 *м*. В диапазоне частот, превышающем 10^5 *гц*, всегда выгодно применять керамические конденсаторы. Даже для контуров высокочастотных печей, рассчитанных на длинные волны, при емкости батареи до 60 000 *мкмкф*, оказалось вполне рациональным использовать не слюдяные конденсаторы типа „Фарадон", а керамические, например, боченочные.

Что касается низковольтных слюдяных конденсаторов, то требования современной радиотехники далеко превышают возможности, которыми характеризуется слюда как диэлектрик. Слюдяные конденсаторы не могут быть получены с однозначным температурным коэфициентом емкости. Температурная цикличность слюдяных конденсаторов лучших типов составляет 0,1%, в то время как для керамических конденсаторов предусматривается не более 0,05% и практически лежит в пределах точности измерений.

Развитие в Союзе специальной электрокерамики выявило большие преимущества керамических конденсаторов сравнительно с другими типами, применяемыми в технике высоких частот. Объясняется это широкими возможностями, которые имеются для получения высокочастотных керамических конденсаторов с самыми разносторонними свойствами. Керамика может быть получена с небольшой диэлектрической проницаемостью (как у слюды, стекла) и чрезвычайно высокого значения—до 100 и даже до 10000. Диэлектрические потери некоторых типов керамических конденсаторов, выпускаемых в Союзе, исключительно малы и не уступают потерям слюдяных и даже кварцевых конденсаторов.

Температурный коэфициент емкости керамических конденсаторов, как уже указывалось, может быть не только положительным, но и большим отрицательным, а также при соответствующем выборе состава керамики — ничтожно малым. Емкость керамических конденсаторов не изменяется с течением времени.

На рисунках 184—188 показаны различные конструкции выпускаемых в настоящее время высоковольтных и низковольтных керамических конденсаторов.

По конструктивным возможностям керамика позволяет получение конденсаторов для самых различных назначений.

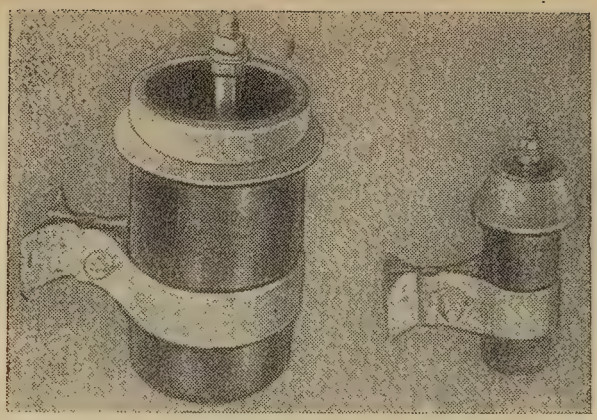


Рис. 184. Высоковольтные конденсаторы горшкового типа из тиконда Т-60.

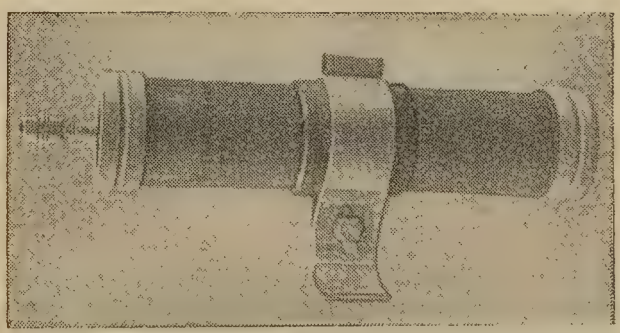


Рис. 185. Высоковольтный трубчатый конденсатор из тиконда Т-60.

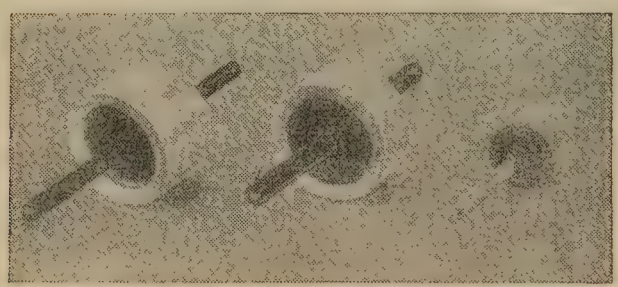


Рис. 186. Боченочные конденсаторы из тиконда и ультрафарфора.

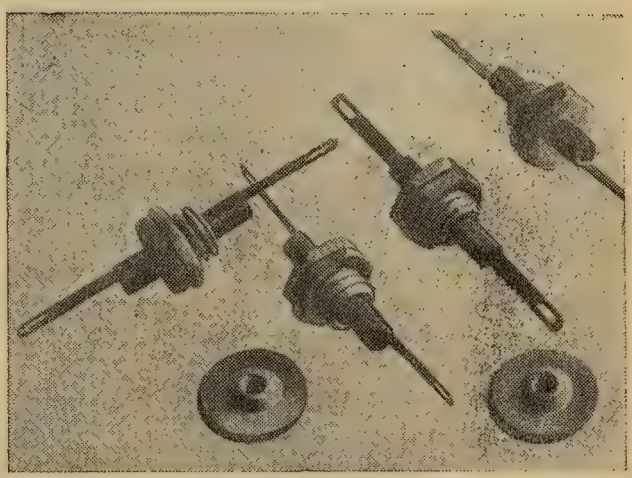


Рис. 187. Проходные керамические конденсаторы.

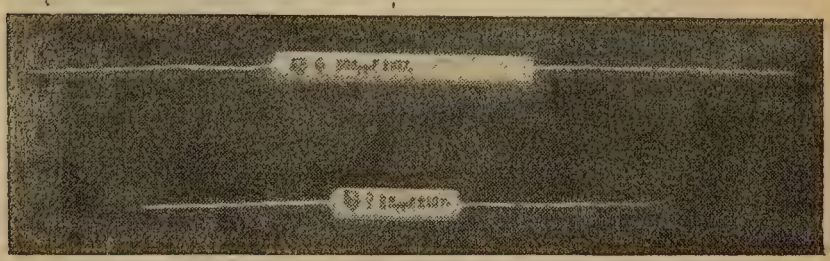


Рис. 188. Герметизированные трубчатые керамические конденсаторы.

Для приемной и передающей радиоаппаратуры выпускаются тонкостенные малогабаритные трубочки очень большой емкости, для мощных высоковольтных устройств из керамики изготовляются толстостенные конденсаторы горшкового, боченочного или трубчатого типов на напряжение до 50 *кв*. Наконец, гибкая технология керамики позволяет изготовление конденсаторов переменной емкости для низких и даже высоких напряжений. Важнейшей особенностью керамики является доступность сырья и технология, легко обеспечивающая массовое производство. В этом отношении перспективу для развития высокочастотных конденсаторов имеет именно керамика, а не слюда или кварц, отличающиеся или дефицитностью сырья или труднейшей технологией. Ниже мы дадим основные принципы проектирования и расчета мощных высоковольтных керамических конденсаторов и низковольтных керамических конденсаторов.

§ 91. Конструирование и расчет мощных высокочастотных конденсаторов

Выбор диэлектрика конденсатора для того или иного электрического устройства определяется всеми его характеристиками — емкостью, реактивной мощностью и напряжением, которое может вызвать электрический пробой стенки конденсатора или перекрытие конденсатора по поверхности. Правильное проектирование конденсатора возможно только при одновременном рассмотрении указанных характеристик. Таким образом, необходимо знать величины угла диэлектрических потерь при разных температурах, пробивной напряженности и диэлектрической проницаемости. Другие электрические свойства диэлектрика, как например, температурный коэфициент диэлектрической проницаемости, для мощных конденсаторов, обычно, не имеют существенного значения.

Имея в виду наличие керамики с малой, а также с очень большой диэлектрической проницаемостью только при очень больших значениях емкости возникают затруднения для обеспечения нужной емкости. Что касается габаритных размеров конденсатора, то они в первую очередь определяются диэлектрическими потерями материала и при высоких напряжениях — величиной разрядного напряжения по поверхности и электрической прочностью материала. Высоковольтный высокочастотный конденсатор должен иметь $\mathrm{tg}\delta$ не больше 0,001. Этому условию удовлетворяет ряд керамических материалов — ультрафарфор, тиконд, радиостеатит и др.

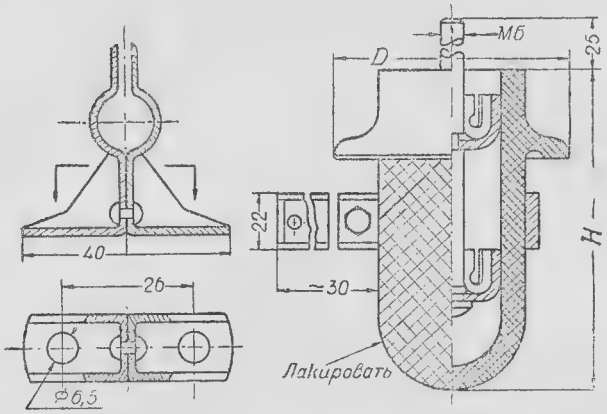
Конденсатор, у которого удельная реактивная мощность, т. е. мощность, отнесенная к единице объема материала, составляет наибольшую величину, является наивыгоднейшим. При высоких напряжениях высокой частоты важнейшее значение приобретают не только диэлектрические потери и диэлектрическая проницаемость материала конденсатора, но и сама конфигурация его. В зависимости от последней получается та, или другая величина активной охлаждающей поверхности, т. е. поверхности, рассеивающей выделяющееся в конденсаторе тепло. Одновременно конфигурация в сильнейшей степени влияет на величину разрядного напряжения. До последнего времени в нашей и заграничной технике выпускались конденсаторы в виде горшков, трубок и дисков. С точки зрения активной поверхности наилучшим типом является дисковый, по поверхностному разряду—горшковый. Трубчатый тип уступает горшковому по перекрытию, а по активной теплоотводящей поверхности—хуже дискового. Преимущество трубки состоит в наиболее простой технологии изготовления. В самое последнее время у нас разработан новый тип конденсатора, так называемый боченочный, или шаровой. Отличительной особенностью этого конденсатора является очень высокое значение разрядного напряжения по поверхности, при чрезвычайно малых размерах. В боченочном конденсаторе напряженность электрического поля у краев электродов в значительной степени сглаживается. Одновременно вся поверхность конденсатора является активной в отношении теплоотвода. Боченочные конденсаторы при средних и длинных волнах могут быть эффективно использованы, когда диэлектрик отличается повышенным значением диэлектрической проницаемости (тиконд), а при коротких волнах—малой диэлектрической проницаемостью (ультрафарфор, радиостеатит).

В таблицах 39—41 представлены чертежи горшковых, трубчатых и боченочных конденсаторов и даны их основные характеристики.

Из приведенных данных видно, что наилучшим образом материал используется в случае боченочного конденсатора. Здесь совершенно не требуется дополнительных поверхностей для увеличения разрядных напряжений и вся поверхность конденсатора является активной. Наоборот, в трубчатом конденсаторе до 40% поверхности не используется по теплоотдаче и служит только для повышения разрядного напряжения. Несмотря на такое, на первый взгляд невыгодное, соотношение полной и активной поверхностей и, следовательно, большой расход материала в трубчатом и горшковом конденсаторах, они вполне оправдывают свое назначение. Боченочные конденсаторы в подавляющем большинстве случаев выгодны лишь тогда, когда не требуется очень

Таблица 39

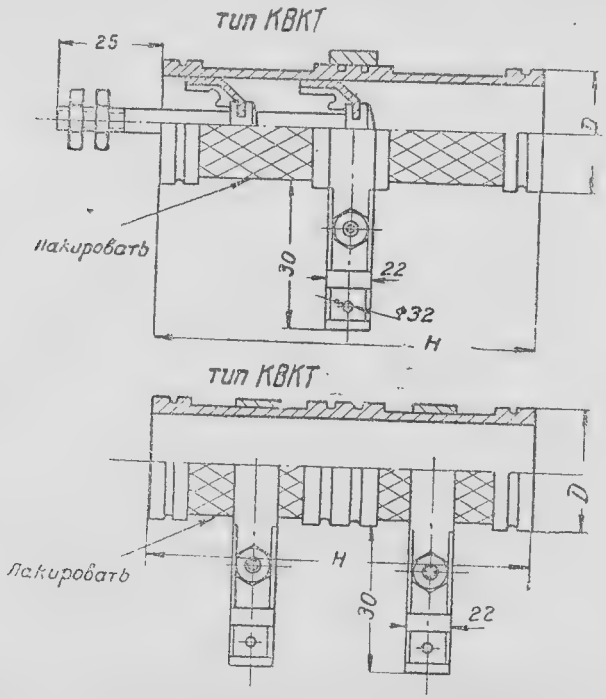
Керамические высоковольтные конденсаторы горшкового типа (КВКГ)



№№ по пор.	Емкость в *мкмкф* ±20%	Реактивная мощность, *ква*	Напряжение выс. частоты, $U_{эфф}$ *кв*		Напряжение пост. тока, *кв*		Размеры в *мм*	
			допуст. рабочее	испытательн.	допуст. рабочее	испытательн.	D	H
Окраска оранжевая $\operatorname{tg}\delta < 0{,}001$; ТКЕ $= -(570 \pm 70) \cdot 10^{-6}$ Группа Ж								
1	2200	6	2	2,5	5	10	65	110
2	1500	6	2	2,5	5	10	65	110
3	1000	6	4	5	7	14	55	110
4	680	5	2,5	3	7	14	45	100
5	470	5	4	5	8	16	55	80
6	470	4	2	2,5	5	10	35	70
7	330	3	2,5	3	5	10	35	60
8	220	4	4	5	9	18	45	60
Окраска синяя $\operatorname{tg}\delta < 0{,}001$; ТКЕ $= +(120 \pm 30) \cdot 10^{-6}$ Группа С								
9	150	10	4	5	15	30	55	135
10	100	10	8	10	15	30	55	135
11	68	10	10	12,5	15	30	55	135
12	47	8	8	5	15	30	45	105
Окраска зеленая $\operatorname{tg}\delta < 0{,}004$; ТКЕ $= +(200 \pm 50) \cdot 10^{-6}$ Группа Ц								
13	1000	15	6	7,5	20	40	215	240
14	470	8	6	7,5	25	50	135	210
15	100	2	6	7,5	25	50	85	120
16	47	1	3	4	25	50	55	110

Таблица 40а

Керамические высоковольтные конденсаторы трубчатые (КВКТ)



№№ по пор.	Емкость, *мкмкф* ± 20%	Реактивная мощность *ква*	Напряжение выс. частоты, $U_{эфф}$ *кв*		Напряжение пост. тока, *кв*		Размеры *мм*	
			допустимое рабочее	испытательное	допустимое рабочее	испытательное	*D*	*H*
Окраска оранжевая $tg\,\delta \leq 0{,}001$; ТКЕ $= -(570 \pm 70) \cdot 10^{-6}$ группа Ж								
1	1500	6	2,5	3,0	3	6	40	150
2	330	6	5,0	6,0	6	12	40	150
Окраска синяя $tg\,\delta \leq 0{,}001$; ТКЕ $= +(120 \pm 30) \cdot 10^{-6}$ группа С								
3	220	10	5,0	6,5	6	12	40	170
4	47	10	10,0	12,5	12	24	40	170

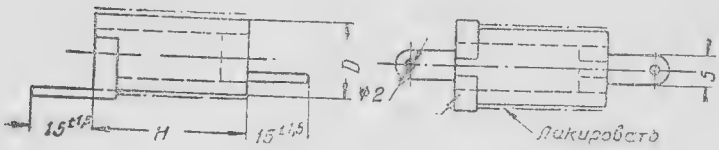
Таблица 406

Керамические высоковольтные конденсаторы трубчатые (КВКТ)

№№ по пор.	Емкость, *мкмкф* ±10%	Реактивная мощность *ква*	Напряжение выс. частоты $U_{эфф}$ *кв*		Напряжение пост. тока, *кв*		Размеры *мм*	
			допустимое рабочее	испытательное	допустимое рабочее	испытательное	*D*	*H*
Окраска оранжевая tg δ ≤ 0,001; ТКЕ = —(570 ± 70) · 10^{-6} группа Ж								
1	680, 560	0,5	0,3	0,4	1	2	8	50
2	560 ÷ 390	0,4	0,3	0,4	1	2	8	40
3	390 ÷ 220	0,3	0,3	0,4	1	2	8	30
4	220 ÷ 100	0,2	0,3	0,4	1	2	8	20
Окраска синяя tg δ ≤ 0,001; ТКЕ = +(120 ± 30) · 10^{-6} группа С								
5	120 ÷ 82	0,5	0,6	0,7	1	2	8	50
6	82 ÷ 56	0,4	0,6	0,7	1	2	8	40
7	56 ÷ 33	0,3	0,6	0,7	1	2	8	30
8	33 ÷ 15	0,2	0,6	0,7	1	2	8	20
Окраска голубая tg δ ≤ 0,001; ТКЕ = —(50 ± 30) · 10^{-6} группа М								
9	390 ÷ 270	0,5	0,5	0,6	1	2	8	50
10	220 ÷ 180	0,4	0,5	0,6	1	2	8	40
11	150 ÷ 82	0,3	0,5	0,6	1	2	8	30
12	82 ÷ 39	0,2	0,5	0,6	1	2	8	20

Таблица 40в

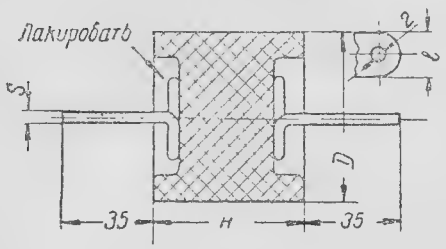
Керамические высоковольтные конденсаторы трубчатые (КВКТ)



№№ по пор.	Емкость, *мкмкф* ±10%	Реактивная мощность *ква*	Напряжение выс. частоты $U_{эфф}$ *кв*		Напряжение пост. тока, *кв*		Размеры *мм*	
			допустимое рабочее	испытательное	допустимое рабочее	испытательное	*D*	*H*
Окраска оранжевая tg δ ≤ 0,001; ТКЕ = —(570 ± 70) · 10^{-6} группа Ж								
1	680, 560	1,2	0,8	1	2,5	5	18	60
2	560 ÷ 470	1,0	0,8	1	2,5	5	18	50
3	470 ÷ 330	0,8	0,8	1	2,5	5	18	40
4	330 ÷ 220	0,6	0,8	1	2,5	5	18	30
Окраска синяя tg δ ≤ 0,001; ТКЕ = +(120 ± 30) · 10^{-6} группа С								
5	150 ÷ 120	1,2	1,0	1,2	2,5	5	18	60
6	120 ÷ 82	1,0	1,0	1,2	2,5	5	18	50
7	82 ÷ 68	0,8	1,0	1,2	2,5	5	18	40
8	68 ÷ 33	0,6	1,0	1,2	2,5	5	18	30
Окраска голубая tg δ ≤ 0,001; ТКЕ = — (50 ± 30) · 10^{-6} группа М								
9	220 ÷ 180	1,2	0,8	1	2,5	5	18	60
10	180 ÷ 150	1,0	0,8	1	2,5	5	18	50
11	150 ÷ 100	0,8	0,8	1	2,5	5	18	40
12	100 ÷ 68	0,6	0,8	1	2,5	5	18	30

Таблица 41

Керамические высоковольтные конденсаторы боченочные (КВКБ)



D	l	S
35	6,5	0,6
19	5	0,5

№№ по пор.	Емкость, *мкмкф* ± 10%	Реактивная мощность, *ква*	Напряжение выс. частоты $U_{эфф}$ *кв*		Напряжение пост. тока, *кв*		Размеры в *мм*	
			допуст. рабочее	испытательн.	допуст. рабочее	испытательн.	D	H
Окраска красная $tg\delta \leqslant 0{,}001$; ТКЕ $= -(730 \pm 70) \cdot 10^{-6}$ Группа Д								
1	68	2,5	3,5	4	4	8	19	15±2
2	56	2,5	3,5	4	4	8	19	15±2
3	47	2,5	3,5	4	4	8	19	15±2
4	39	2 5	3,5	4	4	8	19	15±2
5	33	2,5	3,5	4	4	8	19	15±2
6	27	2,5	3,5	4	4	8	19	15±2
7	22	2,5	5	6	5	10	19	15±2
8	15	2,5	5	6	5	10	19	15±2
Окраска оранжевая $tg\delta \leqslant 0{,}001$; ТКЕ $= -(570 \pm 70) \cdot 1^{0-6}$ Группа Ж								
9	56	4	6	8	8	16	35	18±2
10	47	4	6	8	8	16	35	18±2
11	39	4	6	8	8	16	35	18±2
12	33	5	10	12	10	20	35	23±2
13	27	5	10	12	10	20	35	23±2
14	22	5	10	12	10	20	35	23±2
Окраска синяя $tg\delta \leqslant 0{,}001$; ТКЕ $= +(120 \pm 30) \cdot 10^{-6}$ Группа С								
15	10	3	8	10	10	20	35	18±2
16	8	3	8	10	10	20	35	18±2
17	6	3	8	10	10	20	35	18±2
18	4	3	10	12	10	20	35	18±2
19	2,5	1	3,5	4	5	10	19	18±2

Нормальная шкала емкостей конденсаторов (по ГОСТу 2519—44)

Классы точности								
± 5%			± 10%			± 20% и более		
10	100	1000	10	100	1000	10	100	1000
11	110	1100	—	—	—	—	—	—
12	120	1200	12	120	1200	—	—	—
13	130	1300	—	—	—	—	—	—
15	150	1500	15	150	1500	15	150	1500
16	160	1600	—	—	—	—	—	—
18	180	1800	18	180	1800	—	—	—
20	200	2000	—	—	—	—	—	—
22	220	2200	22	220	2200	22	220	2200
24	240	2400	—	—	—	—	—	—
27	270	2700	27	270	2700	—	—	—
30	300	3000	—	—	—	—	—	—
33	330	3300	33	330	3300	33	330	3300
36	360	3600	—	—	—	—	—	—
39	390	3900	39	390	3900	—	—	—
43	430	4300	—	—	—	—	—	—
47	470	4700	47	470	4700	47	470	4700
51	510	5100	—	—	—	—	—	—
56	560	5600	56	560	5600	—	—	—
62	620	6200	—	—	—	—	—	—
68	680	6800	68	680	6800	68	680	6800
75	750	7500	—	—	—	—	—	—
82	820	8200	82	820	8200	—	—	—
91	910	9100	—	—	—	—	—	—

большая емкость или очень большая реактивная мощность. В противном случае, чтобы обеспечить нужную емкость или нужную реактивную мощность, возникает необходимость включения в схему очень больших количеств мелких единиц, что усложняет монтаж и эксплоатацию устройства. Наконец, при сверхвысоких напряжениях высокой частоты более 15 *кв* боченочные конденсаторы опять теряют свое преимущество из-за необходимости увеличения неактивной поверхности.

Толщина стенки конденсатора определяется из выражения, которое выводится на основании соображений о тепловом балансе выделяющегося и рассеиваемого тепла.

Толщина диэлектрика конденсатора равна:

$$\Delta = k U^2 f \varepsilon \cdot \operatorname{tg}\delta \frac{1}{9 \cdot 10^{11}}, \qquad (81)$$

где Δ—толщина стенки, а k—некоторый коэфициент, который зависит от допустимой температуры перегрева поверхности конденсатора сверх окружающей, от коэфициента теплоотдачи и от конфигурации конденсатора.

Необходимая толщина стенки в формуле (81) и значение коэфициента k находится из соотношения:

$$P_{\alpha} = U^2 \omega C \operatorname{tg}\delta = U^2 \cdot 2\pi f \frac{\varepsilon S_э}{4\pi\Delta \cdot 9 \cdot 10^{11}} \operatorname{tg}\delta = \sigma S (t_2 - t_1), \qquad (82)$$

где $S_э$ —поверхность электрода; S—поверхность, участвующая в рассеянии тепла; σ—коэфициент теплоотдачи для нормальных условий (в среднем может быть принят равным 0,001 *вт/см² град*).

При искусственном охлаждении значение σ сильно возрастает, достигая трех-четырехкратного увеличения при обдувании воздухом (вентиляция) и, как показал Б. И. Иванов, двадцати-тридцатикратного при водяном охлаждении конденсатора. В последнем случае в формуле (82) должна быть учтена теплопроводность материала, которая становится сравнимой с коэфициентом теплоотдачи.

Температуры t_2 и t_1 относятся соответственно к поверхности конденсатора и окружающей среде. Рабочая температура конденсатора не должна превышать 90—100°, исходя из запаса электрической прочности и термической стойкости конденсатора.

Решая соотношение (82) относительно Δ, получим

$$\Delta = \frac{U^2 \cdot f \cdot \varepsilon \operatorname{tg}\delta \cdot S_э}{2 \cdot 9 \cdot 10^{11} \sigma (t_2 - t_1) \cdot S} = k \frac{U^2 f \varepsilon \cdot \operatorname{tg}\delta}{9 \cdot 10^{11}}.$$

Таким образом

$$k = \frac{S_э}{2\sigma(t_2 - t_1) \cdot S} = \frac{1}{2\sigma(t_2 - t_1)k'}, \tag{83}$$

где

$$k' = \frac{S}{S_э} \tag{84}$$

Коэфициент k' характеризует конфигурацию конденсатора и имеет значение от 1 до 2÷5. Легко видеть, что отношение активной поверхности охлаждения к поверхности, определяющей электрическую емкость (поверхность электрода), наиболее выгодно для боченочного конденсатора и наименее выгодно для горшкового и трубчатого.

Значения k' для различных типов конденсаторов

Горшковый	1,0
Трубчатый	1,5
Дисковый	2,0
Боченочный	5,0

Если рассматривать разные материалы при одной и той же конфигурации конденсатора, то выражение для удельной реактивной мощности высокочастотного конденсатора может быть представлено в следующем виде:

$$P_V = \frac{P_р}{V} = \frac{U^2 2\pi f \varepsilon S}{4\pi \Delta S \Delta 9 \cdot 10^{11}} = \frac{U^2 f \varepsilon}{2\Delta^2 9 \cdot 10^{11}}, \tag{85}$$

где $P_р$—допустимая реактивная мощность; V—объем конденсатора.

Подставляя в (85) выражение (81), получаем

$$P_V = \frac{9 \cdot 10^{11}}{2k^2 U^2 f \varepsilon \cdot \operatorname{tg}^2 \delta}. \tag{86}$$

Анализируя выражение (81), можно видеть, что при малых напряжениях и низких частотах необходимо применять керамику с повышенным значением диэлектрической проницаемости, чтобы обеспечить не слишком тонкую стенку конденсатора. Напротив, при очень высоких напряжениях и коротких волнах следует использовать керамику с малым значением диэлектрической проницаемости, чтобы не получить слишком толстую стенку. Ничтожно малое значение $\operatorname{tg}\delta$ материала даже в последнем случае позволяет при высокой диэлектрической проницаемости иметь приемлемую по толщине стенку конденсатора.

Выражение (86) показывает, что удельная реактивная мощность конденсатора при заданных напряжении и часто-

те в сильнейшей степени зависит от диэлектрических потерь и выбранной конфигурации (коэфициент k'). Возрастание диэлектрической проницаемости приводит к снижению удельной мощности при неизменном значении $tg\delta$. Однако, это не значит, что малая диэлектрическая проницаемость ведет всегда к увеличению удельной мощности, так как при малой диэлектрической проницаемости необходимо применять очень тонкие стенки, что, с одной стороны, бывает нереально по технологическим возможностям керамики, а с другой,—может привести к изменению конфигурации. Например, боченочный тип превращается в дисковый, что сказывается на величине теплоотдачи, так как коэфициент k входит в выражение (86) удельной реактивной мощности во второй степени.

Что касается размеров внешней поверхности конденсатора, то она определяется только углом потерь материала при прочих равных условиях. В таблице 42 показано, в каких случаях нужно применять тот или иной диэлектрик и соответствующую конфигурацию.

Рассматривая данные таблицы 42, видим, что эффективное использование материала связано с выбором конфигурации конденсатора. При высоких напряжениях и длинных волнах трубчатый конденсатор наиболее целесообразно изготовлять из материала типа ультрафарфора с углом потерь около 1,5′ или тиконда с углом потерь около 0,3 минуты. Уменьшение потерь ультрафарфора до 0,5 минуты, с точки зрения габаритов конденсатора не дает преимущества, так как уменьшить толщину стенки до 1,5—2 *мм* мы не можем по технологическим соображениям и соображениям об электрической прочности, и конденсатор останется ненагруженным. Тиконд с углом потерь более 1 минуты для трубчатых конденсаторов совсем непригоден при данных условиях. Однако при низких напряжениях и длинных волнах, как это следует из формулы 86, тиконд с повышенными потерями может быть удачно использован в виде трубки. Боченочный конденсатор при данных условиях наиболее выгодно изготовлять из тиконда с очень малыми потерями, с углом потерь около 0,5′. Боченочный конденсатор из ультрафарфора при указанных электрических характеристиках совсем неприемлем из-за очень тонкой стенки в связи с малой диэлектрической проницаемостью его. Напротив, при коротких волнах боченочные конденсаторы нужно делать из керамики с низкой диэлектрической проницаемостью и очень малыми потерями. Очевидно, боченочный конденсатор целесообразен при очень малых потерях, когда в единице можно сосредоточить большую реактивную мощность.

Таблица 42

Сравнительные характеристики конденсаторов разной конструкции

Материал	Угол потерь в минутах	Диэлектрич. проницаемость ε	Нагрузка: Напряжение в *кв* $U_{эфф}$	Нагрузка: Частота в *гц*	Толщина стенки в *мм*	Удельная реактивная мощность P_V, $\frac{ва}{см^3}$	Емкость единицы поверхности в $\mu\mu F$
1. Трубчатый конденсатор							
Ультрафарфор	3	7	10	$2 \cdot 10^5$	10	70	0,62
—	1,5	7	10	$2 \cdot 10^5$	5	280	1,24
—	0,5	7	10	$2 \cdot 10^5$	1,7	2500	3,72
Тиконд	3	70	10	$2 \cdot 10^5$	100	7	0,62
—	0,3	70	10	$2 \cdot 10^5$	10	700	6,2
2. Боченочный конденсатор							
Ультрафарфор	3	7	10	$2 \cdot 10^5$	3,3	780	1,86
—	0,5	7	10	$2 \cdot 10^5$	0,55	28000(!)	11,2
Тиконд	3	70	10	$2 \cdot 10^5$	3,33	78	1,86
—	0,3	70	10	$2 \cdot 10^5$	3,3	7800	18,6

§ 92. Низковольтные высокочастотные керамические конденсаторы

Низковольтные конденсаторы предназначаются для радиоприемной аппаратуры, задающих каскадов радиопередатчиков, фильтров, измерительных схем и других подобных устройств. Выпускаются эти конденсаторы постоянной емкости и подстроечные переменной емкости (триммеры). В том и в другом случаях габаритные размеры конденсаторов определяются величиной емкости и, очевидно, будут тем меньше, чем выше диэлектрическая проницаемость материала и чем меньше допустимая толщина диэлектрика. Удельная емкость конденсатора может быть выражена формулой

$$\frac{C}{V} = \frac{S}{4\pi\Delta S\Delta} \simeq 0{,}08\,\frac{\varepsilon}{\Delta^2}\,, \qquad (87)$$

где C—емкость конденсатора,
V—объем,
Δ—толщина стенки.

Как следует из выражения (87), уменьшение толщины диэлектрика может иметь в отдельных случаях большее влияние на габариты конденсатора, чем выбор материала с повышенной диэлектрической проницаемостью. Конструктивно низковольтные конденсаторы изготовляются в виде дисков и в виде трубочек.

Площадь плоских конденсаторов и диаметр трубчатых не должны быть велики. Большая поверхность конденсаторов вызывает необходимость увеличения толщины из соображений механической прочности по условиям технологии. Тонкие пластинки большой площади легко ломаются, тонкостенные трубки большого диаметра деформируются при протяжке через мундштук. В связи с указанным и на основании формулы (87) плоские конденсаторы имеют поверхность не более двух квадратных сантиметров при толщине до 0,5 *мм*, а диаметр трубок выбирается до 4 *мм* при толщине стенки 0,3—0,2 *мм*.

Подстроечные конденсаторы обеспечивают большую емкость, если ротор пришлифован к статору с оптической точностью, во избежание последовательного включения воздушного промежутка.

Величина емкости керамических конденсаторов может быть получена с точностью, определяющейся назначением конденсатора, и достигает $\pm 0{,}5\%$ благодаря подгонки площади металлического слоя серебра, служащего электродами.

Малогабаритные конденсаторы по своему назначению должны отличаться или очень малым температурным коэффициентом емкости или заданным — обычно отрицательным, когда они предназначены для термокомпенсации параметров контура. Поэтому диэлектриком таких конденсаторов не может быть один вид керамики. Виды конденсаторной керамики, освоенные в Союзе, были указаны ранее. Диэлектрические потери низковольтных конденсаторов не должны быть велики; добротность контура не должна снижаться заметно за счет потерь конденсатора. В ряде случаев можно допустить tgδ маломощного конденсатора до 0,0015, если иметь в виду, что затухание контура в основном определяется катушкой индуктивности.

Низковольтные высокочастотные конденсаторы должны обладать высокой цикличностью, отсутствием старения под влиянием влаги и переменной температуры.

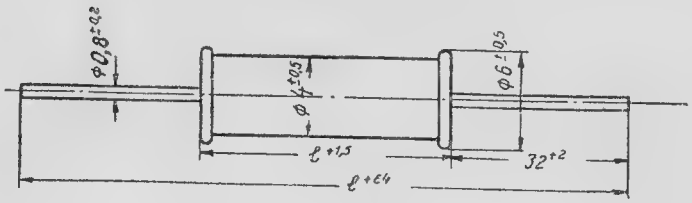
Относительное изменение емкости конденсатора после температурных циклов должно быть менее 0,05%.

В условиях высокой влажности (около 100%) параметры керамического конденсатора (емкость, угол потерь) изменяются. Однако, поскольку материал непористый, емкость и потери быстро восстанавливаются—как только относительная влажность окружающей среды уменьшится. Полную неизменяемость параметров конденсатора во влажной среде обеспечить почти невозможно. Компаундировка конденсаторов вязким органическим составом или капсюлирование их в керамический кожух ослабляет влияние влаги. Трудности выбора компаунда с широким интервалом размягчения—отсутствием хрупкости при низких температурах и с достаточной вязкостью при повышенной температуре — заставляет предпочитать герметизацию в керамический кожух, когда значительно повышается расстояние между электродами.

Лакировка негерметизированных конденсаторов органическими цветными эмалями защищает поверхность от загрязнений, придает им красивый внешний вид и обеспечивает маркировку в соответствии с классом по *ТКЕ*. Слой лака должен быть тонким, с тем чтобы влага легко удалялась с поверхности конденсатора. Лучшими цветными эмалями являются разработанные Б. И. Яковлевым масляно-бакелитовые. Проверка слабых мест низковольтных конденсаторов должна производиться испытанием их высоким напряжением — постоянным или переменным промышленной частоты, при амплитудном значении не менее 1000 *в*. В таблицах 43 — 46 приведены конструкции и характеристики низковольтных конденсаторов постоянной емкости и подстроечных конденсаторов, выпускаемых в Союзе.

Таблица 43

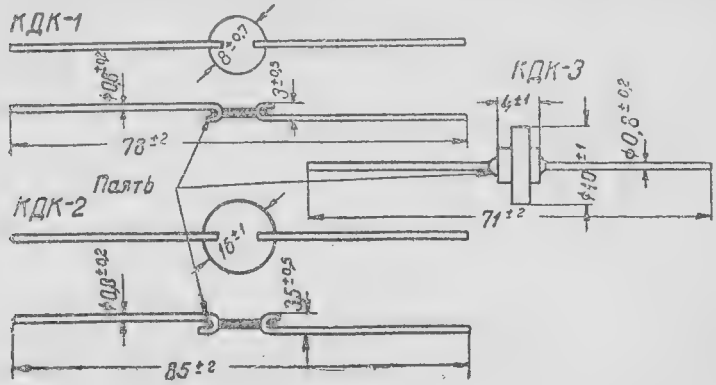
Керамические низковольтные конденсаторы трубчатые (КТК)



Характеристика конденсатора	Емкость в *мкмкф* с точностью ±10%, 5% или 2% до ±0,2 *мкмкф*				
Тип	КТК-1	КТК-2	КТК-3	КТК-4	КТК-5
l, *мм*	11	20	30	40	50
Допустимая реактивная мощность, *ва*	25	50	75	100	125
Группа Д ТКЕ=—(730±70)·10^{-6}, окраска красная	2—200	100—360	240—560	430—750	680—1000
Группа Ж ТКЕ=—(570±70)·10^{-6}, окраска оранжевая	2—150	100—300	240—430	390—620	560—750
Группа К ТКЕ=—(300±50)·10^{-6}, окраска желтая	2—51	39—100	91—180	160—240	240—300
Группа Л ТКЕ=—(130±50)·10^{-6}, окраска зеленая	2—51	39—120	110—200	180—300	270—360
Группа М ТКЕ=—(50±30)·10^{-6}, окраска голубая	2—39	30—91	82—150	130—200	180—240
Группа Р ТКЕ=+(30±30)·10^{-6}, окраска серая	2—15	10—39	36—62	56—82	75—120
Группа С ТКЕ=+(120±30)·10^{-6}, окраска синяя	2—15	10—30	24—51	43—68	62—100

Таблица 44

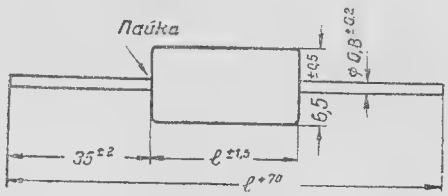
Керамические низковольтные конденсаторы дисковые (КДК)



Характеристика конденсатора	Емкость в *мкмкф* с точностью ±10%, 5% или 2% до ±0,2 *мкмкф*		
Тип	КДК-1	КДК-2	КДК-3
Допустимая реактивная мощность, *ва*	25	75	25
Группа Д ТКЕ $=-(730\pm70)\cdot10^{-6}$, окраска красная	3—30	30—130	30—75
Группа Ж ТКЕ $=-(570\pm70)\cdot10^{-6}$, окраска оранжевая	2—20	20—100	20—62
Группа К ТКЕ $=-(300\pm50)\cdot10^{-6}$, окраска желтая	1,5—10	10—30	10—20
Группа Л ТКЕ $=-(130\pm50)\cdot10^{-6}$, окраска зеленая	1—10	10—30	10—20
Группа М ТКЕ $=-(50\pm30)\cdot10^{-6}$, окраска голубая	1—7	7—20	3—10
Группа Р ТКЕ $=+(30\pm30)\cdot10^{-6}$, окраска серая	0,5—5	5—15	1—7
Группа С ТКЕ $=+(120\pm30)\cdot10^{-6}$, окраска синяя	0,5—3	3—10	1—5

Таблица 45

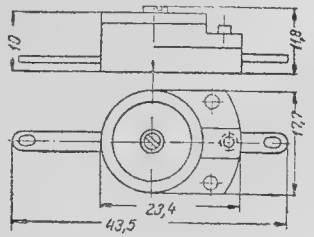
Керамические низковольтные конденсаторы герметизированные (КГК)



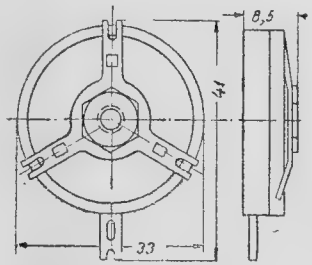
Характеристика конденсатора	Емкость в *мкмкф* с точностью ±10%, 5% или 2% до ±0,2 *мкмкф*				
Тип	КГК-1	КГК-2	КГК-3	КГК-4	КГК-5
l, мм	16	25	35	45	55
Допустимая реактивная мощность, *ва*	25	50	75	100	125
Группа Д ТКЕ=—(730±70)·10^{-6}, окраска красная	5—200	100—360	240—560	430—750	680—1000
Группа Ж ТКЕ=—(570±70)·10^{-6}, окраска оранжевая	5—150	100—300	240—430	390—620	550—750
Группа К ТКЕ=—(300±50)·10^{-6}, окраска желтая	5—51	39—100	91—180	160—240	240—300
Группа Л ТКЕ=—(130±50)·10^{-6}, окраска зеленая	5—51	39—120	110—220	180—300	270—360
Группа М ТКЕ=—(50±30)·10^{-6}, окраска голубая	5—39	30—91	82—150	130—200	180—240
Группа Р ТКЕ=+(30±30)·10^{-6}, окраска серая	5—15	10—39	36—62	56—82	75—102
Группа С ТКЕ=+(120±30)·10^{-6}, окраска синяя	5—15	10—30	24—51	43—68	62—120

Таблица 46

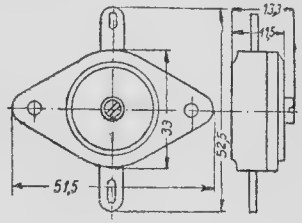
Конденсаторы подстроечные керамические (КПК)



КПК-1



КПК-2



КПК-3

Номинальная емкость конденсаторов, *мкмкф*

КПК-1		КПК-2		КПК-3	
Минимальная не более	Максимальная не менее	Минимальная не более	Максимальная не менее	Минимальная не более	Максимальная не менее
2	7	6	60	8	80
4	15	10	100	10	100
6	25	20	150	50	150
8	30	30	200	75	20
		70	250	175	300
		125	300		
		200	350		
		250	400		
		300	450		
		350	500		

Глава XXII

НЕПРОВОЛОЧНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

§ 93. Характеристики сопротивлений

Существующие в настоящее время непроволочные сопротивления разделяются на две основные группы:

1. Сопротивления с линейной зависимостью тока от напряжения, т. е. не показывающие заметного отклонения от закона Ома.

2. Сопротивления, характеризующиеся резким отклонением от закона Ома.

Ток в сопротивлениях с нелинейными характеристиками возрастает пропорционально некоторой степени приложенного напряжения. Они используются в основном в высоковольтной промышленной технике для защиты линий и аппаратов от перенапряжений. Сопротивления этой группы обладают также большим температурным коэфициентом сопротивления. Так называемые термисторы — сопротивления с резкой зависимостью R от t, имеют применение в специальной измерительной технике, вакуумной технике.

Зависимость тока от напряжения для нелинейных сопротивлений выражается степенной функцией вида

$$U = kI^{\beta},$$

где k и β коэфициенты, характеризующие материал.

Сопротивления первой группы находят широкое применение в радиотехнике, в измерительной технике и некоторых специальных областях электротехники. Сопротивления этой группы должны иметь возможно меньшее отклонение от закона Ома и отличаться высокой стабильностью при воздействии температуры и влажности.

В радиопромышленности получили распространение три типа таких сопротивлений.

1. Тонкопленочные—опрессованные в пластмассу („ТО“).
2. Углеродистые поверхностные сопротивления.
3. Объемные сопротивления.

Во всех случаях токоведущим является углерод.

Сопротивления „ТО“, проводящая пленка которых получается путем нанесения суспензии сажи и графита в масляном лаке на стеклянную трубочку (филамент), характеризуются большим температурным коэфициентом, недостаточной влагостойкостью и стареют.

Углеродистые поверхностные сопротивления получаются осаждением углерода на поверхности керамических стерженьков при разложении углеводорода в условиях высокой температуры и отсутствия кислорода. Высокие значения

Таблица 47

№№ по пор.	Тип сопротивления	Диапазон номиналов	Допустимая рабочая температура в °С	Температурный коэфициент	Коэфициент нагрузки в %	Коэфициент напряж., в %	Коэфициент влагостойкости, в %	Коэфициент старения, в %	Мощность в единице, *вт*	Мощность на единицу поверхности, в *вт/см²*
1	Тонкопленочные опрессованные („ТО") сопротивления	300 Ω до 10 *м*Ω	80—100°	$2 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3}$	10÷15	2—10	до 50	до 50	0,25 до 1,5	0,10—0,12
2	Углеродистые поверхностные сопротивления	10 Ω до 10 *м*Ω	80—110°	$0{,}7 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}2 \cdot 10^{-3}$	4	0—2	до 9	до 4	0,25 до 10	0,10—0,17
3	Объемные сопротивления на органической связке (США) . . .	10 Ω до 20 *м*Ω	100—130°	$0{,}6 \cdot 10^{-3} - 6{,}4 \cdot 10^{-3}$	2—15	0—10	до 15	до 15	0,25 до 5	0,05—0,3
4	Керамические сопротивления (керакс). .	5 до 10 000 Ω	120—140°	$0{,}7 \cdot 10^{-3} - 1{,}5 \cdot 10^{-3}$	3—10	2—5	до 15	до 15	0,25 до 50	0,3—0,4
5	Проволочные остекло-ванные сопротивления	0,3 до 50 000 Ω	250—300°	$5 \cdot 10^{-6}$ до $2 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	0	2 до 100	0,75

сопротивлений обеспечиваются удлинением проводящего слоя в виде спирали, нарезаемой тонкими абразивными кругами. Защита слоя от влаги и механических повреждений обеспечивается лаковым покрытием. Эти сопротивления отличаются очень высокими характеристиками.

Объемные сопротивления изготовляются на органической основе и керамической. Объемные сопротивления на органической связке характеризуются также высокими свойствами; преимущество объемных сопротивлений перед поверхностными — большая мощность рассеяния с единицы поверхности и способность выдерживать кратковременные перегрузки.

Керамические сопротивления очень разнообразны по своему назначению. Сопротивления на основе карбидов (силит, глобар) применяются как нагревательные элементы электрических печей и на большие мощности в радиоустройствах. Керамические сопротивления с нелинейными характеристиками,—тирит, вилит,—изготовляются на основе карборунда; сопротивления с очень большим температурным коэфициентом (термисторы) содержат в качестве основы окись титана, окись меди, окись урана. В качестве радиосопротивлений объемного типа в Союзе нашли применение карбокерамические сопротивления (керакс), освоенные в диапазоне низких номиналов.

В таблице 47 приведены сравнительные данные разных типов радиосопротивлений.

ОСНОВНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

1. Определение угла диэлектрических потерь

Основной характеристикой высокочастотного диэлектрика, определяющей его электрические свойства, является угол диэлектрических потерь при радиочастотах.

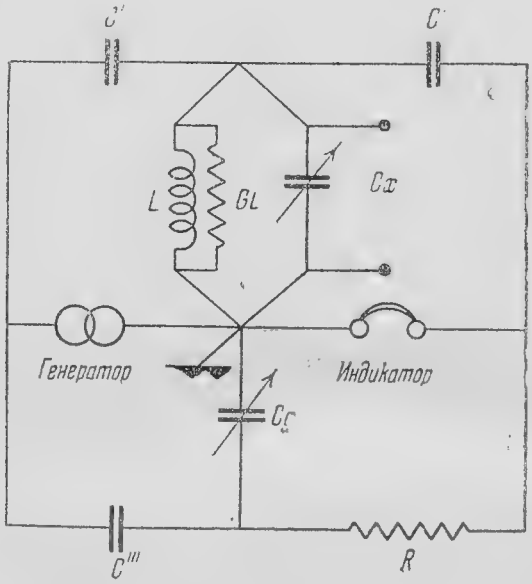


Рис. 1. Схема Twin—T для измерения угла потерь диэлектриков.

Измерение угла потерь в сухом состоянии образца и после увлажнения (после двухчасового кипячения или длительной выдержки в воде или в атмосфере 100% относительной влажности) позволяет судить также о гигроскопичности материала.

Определение угла потерь следует производить при частоте $f=1$ *мгц*, рекомендуемой стандартом. При более коротких волнах для большинства керамических материалов угол потерь не возрастает, а качество материала достаточно

хорошо выявляется при несложной методике измерения при средней волне. Конечно, желательно испытывать материалы и в широком диапазоне частот вплоть до дециметрового.

Электродами при испытаниях керамики должны являться слои серебра, нанесенные вжиганием. В отдельных случаях и при испытании нетеплостойких материалов можно применять тонкую фольгу плотно притираемую к поверхности с помощью парафина.

Современными схемами для измерения $\mathrm{tg}\,\delta$ являются, с одной стороны, мостовые (с нулевыми отсчетами), в частности схема Twin-T тип 821-А фирмы Дженерл Рэдио Компани с одновременным заземлением индикатора и питающего генератора, представленная на рис. 1. С другой стороны, применяется схема Родэ и Шварца с непосредствен-

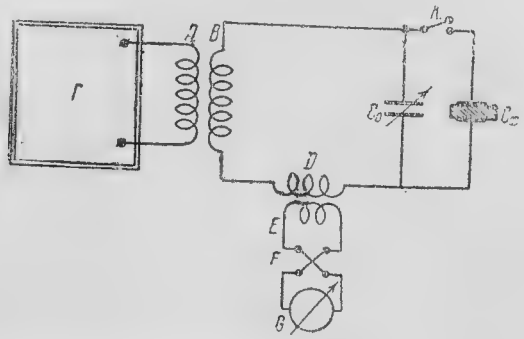


Рис. 2. Схема соединений прибора.

ным отсчетом $\mathrm{tg}\,\delta$ при включении образца. Очень удобна при массовых испытаниях, и принятая у нас в Союзе установка ИП-2, разработанная Е. А. Гайлишем, и прибор Q-метр.

Для лабораторных измерений простой в изготовлении и хорошей по точности является одна из старых схем, основанная на вариации реактивного сопротивления, приведенная на рис. 2.

Здесь $Г$—стабильный генератор с длиной волны $\lambda = 300$ *м*;

A—катушка самоиндукции генератора;

B, D—катушки самоиндукции измерительного контура;

C_0—эталонный конденсатор измерительного контура;

C_x—исследуемый образец;

E—катушка самоиндукции индикатора;

F—термопара (для преобразования переменного тока в постоянный);

G—гальванометр.

Вначале определяют величину расстройки ΔC.

Не включая испытуемый образец C_x и изменяя C_0, снимают зависимость $I=f(c)$, рис. 3.

Гальванометр дает отклонения в градусах, которые затем по градуировочной кривой переводятся в амперы.

Емкость C_0 соответствует току при резонансе I_r.

Емкости C' и C'' определяются величиной расстройки контура; сила тока при расстройке контура равна $\frac{I_r}{\sqrt{2}}$.

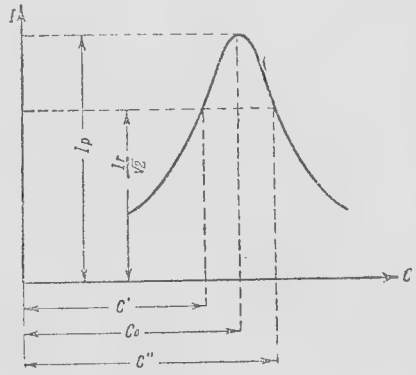


Рис. 3. Кривая расстройки контура.

Можно кривой $I=f(c)$ не строить, а определить I_r, вычислить $\frac{I_r}{\sqrt{2}}$ и установить значение емкости C' в одну сторону от резонанса и C'' в другую сторону, при которых ток будет равен $\frac{I_r}{\sqrt{2}}$.

Величина емкости, отвечающая расстройке, будет

$$\Delta C = C'' - C'.$$

Выражение для сопротивления контура $r_к$ получается из основных соотношений тока и напряжения в контуре в момент резонанса при условии, что емкости C' и C'' соответствуют току $I_1 = I_2 = \frac{I_r}{\sqrt{2}}$.

$$r_к = \frac{1}{2\omega} \cdot \frac{C''-C'}{C' \cdot C''} = \frac{\Delta C}{2\omega C' C''}$$

(вывод формулы приведен ниже).

После этого включают испытуемый образец C_x и находят значение емкости C'_0 в момент резонанса и силу тока [можно и в этом случае построить $I=f(c)$, и из кривой найти значение емкости C'_0 для момента резонанса].

Так как образец включен параллельно, то емкость его C_x находится как разность

$$C_x = C_0 - C'_0.$$

Теперь можно определить эквивалентное сопротивление испытуемого диэлектрика:

$$r_x = r_к \frac{I_r - I_x}{I_x}\left(\frac{C_0}{C_x}\right)^2 = r_x \frac{\Delta I}{I_x}\left(\frac{C_0}{C_x}\right)^2,$$

где $\Delta I = I_r - I_x$.

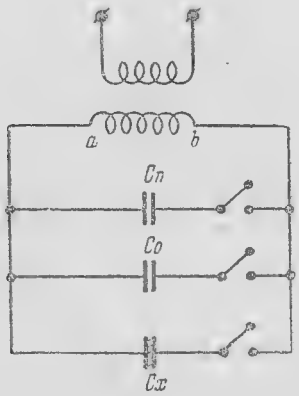


Рис. 4. Схема измерительного контура.

Тангенс угла потерь испытуемого диэлектрика находим из формулы:

$$tg\delta = \frac{\Delta C \cdot \Delta I}{2C_x \cdot I_x}.$$

Величина угла потерь в минутах при малых углах вычисляется

$$\delta' = \frac{\Delta C\, \Delta I}{2{,}9 \cdot 10^{-4} \cdot 2C_x I_x} = \frac{1722 \cdot \Delta C\, \Delta I}{C_x \cdot I_x}.$$

Вывод формулы для $r_к$

При напряжении на катушке „*ab*“ (рис. 4), равном U, ток I_0 в момент резонанса без испытуемого образца определяется по закону Ома:

$$I_0 = \frac{U}{r_к}, \qquad (1)$$

где $r_к$—активное сопротивление контура без испытуемого образца в момент резонанса.

После включения образца C_x и настройки контура в резонанс получим ток I_x, который также определяется по закону Ома;

$$I_x = \frac{U}{r_э}, \tag{2}$$

где $r_э$ — эквивалентное активное сопротивление контура с испытуемым образцом.

При расстройке контура значения сил токов определятся

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{r_к^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C'}\right)^2}}, \tag{3}$$

$$I_2 = \frac{U}{\sqrt{r_к^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C''}\right)^2}}, \tag{4}$$

где C' и C'' — емкости контура без испытуемого образца соответственно меньше и больше резонансной.

Из уравнений (1) и (3) следует, что

$$I_0 r_к = I_1 \sqrt{r_к^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C'}\right)^2},$$

откуда

$$r_к^2 = \frac{I_1^2 \left(\omega L - \frac{1}{\omega C'}\right)^2}{I_0^2 - I_1^2}. \tag{5}$$

Обозначим коэфициент уменьшения тока при расстройке через q; тогда

$$I_1 = \frac{I_0}{q}.$$

Значение емкости C'' выберем так, чтобы

$$I_1 = I_2 = \frac{I_0}{q}. \tag{6}$$

В момент резонанса имеем:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C_r}, \tag{7}$$

где C_r — емкость контура при резонансе

$$C_r = C_x + C_п,$$

$C_п$ — емкость подстроечного конденсатора.

Подставляя значения ωL и I из уравнений (6) и (7) в уравнение (5), имеем:

$$r_к = \frac{\frac{I_0^2}{q^2}\left(\frac{1}{\omega C} - \frac{1}{\omega C'}\right)^2}{I_0^2 - \frac{I_0^2}{q^2}} = \frac{I_0^2 q^2 \left(\frac{1}{\omega C_r} - \frac{1}{\omega C'}\right)^2}{I_0^2 q^2 (q^2 - 1)} =$$

$$= \frac{\frac{1}{\omega C_r} - \frac{1}{\omega C'}}{\sqrt{q^2-1}} = \frac{(C' - C_r)}{\sqrt{q^2-1} \cdot \omega C_r C'} \simeq$$

$$\simeq \frac{C' - C_r}{\sqrt{q^2-1}\ \omega C_r^2}. \qquad (А)$$

По аналогии, пользуясь уравнениями (1) и (4), получим:

$$r_к \simeq \frac{C'' - C_r}{\sqrt{q^2-1} \cdot \omega C_r^2}. \qquad (Б)$$

Решив совместно уравнения (А) и (Б), будем иметь:

$$r_к = \frac{C' - C''}{2\left(\sqrt{q^2-1}\right)\omega C'\, C_r^2} \simeq \frac{C' - C''}{2\omega \cdot C_r^2 \cdot \sqrt{q^2-1}},$$

полагая $q^2 = 2$, окончательно получаем:

$$r_к = \frac{C' - C''}{2\omega C'\, C''} \simeq \frac{\Delta C}{2\omega C'\, C''} \simeq \frac{C' - C''}{2\omega C_r^2}.$$

Вывод формулы для tgδ

В момент резонанса сила тока I_0 без испытуемого образца и I_x с испытуемым образцом определяются из уравнений

$$I_0 = \frac{U}{r_x} \qquad (1')$$

$$I_x = \frac{U}{r_э}, \qquad (2')$$

где $r_э$—активное сопротивление контура с испытуемым образцом, складывающееся из сопротивлений:

$$r_э = r'_x + r_к,$$

где r'_x — активное сопротивление контура, обусловленное образцом (за счет эквивалентного сопротивления образца r_x).

Из уравнений (1′) и (2′) следует:

$$I_0 r_к = I_x r_x ,$$

или

$$\frac{I_0}{I_x} = \frac{r_x}{r_к} ,$$

или

$$\frac{I_0 - I_x}{I_x} = \frac{r_э - r_x}{r_к} ,$$

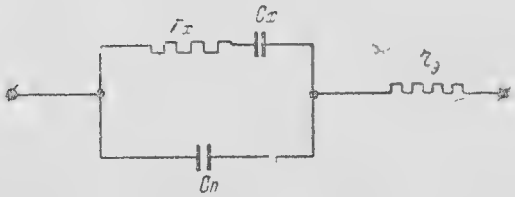


Рис. 5. Эквивалентная схема замещения конденсатора

откуда

$$r_э - r_x = r_к \frac{I_0 - I_x}{I_x} . \qquad (А')$$

Ранее имели

$$r_к = \frac{C' - C''}{2\sqrt{q^2 - 1}\,\omega C_r^2} , \qquad (Б')$$

подставляя в выражение (А′) значение $r_к$, имеем:

$$r_э - r_x = \frac{I_0 - I_x}{I_x} \cdot \frac{C' - C''}{2\left(\sqrt{q^2 - 1}\right)\omega C_r^2} .$$

Тангенс угла потерь ($tg\delta$), как известно, определяется формулой:

$$tg\delta = \omega C_x r_x .$$

Для определения активного сопротивления испытуемого образца r_x рассмотрим эквивалентную схему рис. 5.

При равенстве развиваемых мощностей на r_x и r'_x будем иметь:

$$P = I_0^2 r'_x = I_x^2 \cdot r_x = I_0^2 (r_э - r_к),$$

или

$$\frac{I_x^2}{I_0^2} = \frac{r_э - r_к}{r_x} = \left(\frac{C_x}{C_x + C_п}\right)^2,$$

откуда

$$r_x = (r_э - r_к)\left(\frac{C_x + C_п}{C_x}\right)^2.$$

Подставив значение r_x в выражение для $tg\delta$, получим:

$$tg\delta = \omega C_x (r_э - r_к)\left(\frac{C_x + C_п}{C_x}\right)^2.$$

Заменяя $(r_э - r_к)$ и r_x их значениями, будем иметь:

$$tg\delta = \frac{\omega C_x (C' - C'')(I_0 - I_x)(C_x + C_п)^2}{2\left(\sqrt{q^2 - 1}\right)\omega C_r^2 I_x C_x^2}.$$

Положив $C' - C'' = \Delta C$, $I_0 - I_x = \Delta I$ и $q^2 = 2$, окончательно получим:

$$tg\delta = \frac{\Delta C \cdot \Delta I}{2 C_x I_x}.$$

2. Погрешности измерения основных электрических характеристик

1. Измерение емкостей при радиочастотах

Для массовых измерений емкости применяется прибор типа ГБЕ-2 завода им. Фрунзе, действующий по принципу первичных биений. Частота эталонного генератора—500 *кгц*.

Точность измерения емкостей на приборе ГБЕ-2:

в диапазоне (2—100) *мкмкф* . . . . ±2%
в диапазоне (100—700) *мкмкф* . . . . ±1%
в диапазоне (700—2000) *мкмкф* . . . ±0,5%

2. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь при радиочастотах

При измерениях на приборе *Q*-метр $\operatorname{tg}\delta$ определяется следующим образом:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{C_1 (Q_1 - Q_2)}{(C_1 - C_2) Q_1 \cdot Q_2},$$

где C_1 и Q_1 — соответственно значения емкости и добротности без включения образца, а C_2 и Q_2 — значения емкости и добротности при включенном образце.

Емкость образца C вычисляется как разность $C_1 - C_2$.
Относительная погрешность вычисляется по формуле:

$$\frac{\Delta \operatorname{tg}\delta}{\operatorname{tg}\delta} = \frac{2\Delta C_0}{C_0} + \frac{\Delta C_1}{C_1} + \frac{2\Delta Q_0}{Q_0} + \frac{2\Delta Q_1}{Q_1}.$$

Считая, что погрешность отсчета добротности составляет $\pm 4\%$, погрешность отсчета емкости составляет $\pm 1\%$ и чувствительность по $\operatorname{tg}\delta$ равна $2 \cdot 10^{-4}$, абсолютная погрешность измерения составляет

$$\Delta \operatorname{tg}\delta = 0{,}1 \operatorname{tg}\delta + 2 \cdot 10^{-4}.$$

Емкость измеряемого образца не должна быть менее 15 *мкмкф*.

3. Измерение температурного коэфициента емкости

Измерение температурного коэфициента емкости (*ТКЕ*) при радиочастотах производится по методам первичных или вторичных биений.

В первом случае *ТКЕ* определяется путем компенсации изменения емкости испытуемого конденсатора эталонным конденсатором колебательного контура.

Во втором случае можно производить измерение *ТКЕ* как по данным изменения емкости эталонного конденсатора, так и по данным изменения частоты первичных биений.

Таким образом *ТКЕ* определяется формулами:

$$ТКЕ = \frac{C_1 - C_0}{C_x (T_1 - T_0)} \quad \text{или} \quad ТКЕ = \frac{2\Delta f C_к}{f C_x (T_1 - T_0)},$$

где $C_1 - C_0$ — изменение емкости эталонного конденсатора,
Δf — изменение частоты испытательного генератора, отсчитываемое по звуковому генератору,
$C_к$ — полная емкость контура испытательного генератора,
$T_1 - T_0$ — изменение температуры образца,
C_x — начальная емкость образца.

Относительная погрешность измерения по методу первичных биений составляет:

$$\frac{\Delta ТКЕ}{ТКЕ} = \frac{\Delta (C_1 - C_0)}{C_1 - C_0} + \frac{\Delta C_x}{C_x} + \frac{\Delta T_1}{T_1} + \frac{\Delta T_0}{T_0}.$$

Считая, что погрешность градуировки эталонного конденсатора составляет $\pm 2\%$, погрешность измерения емкости испытуемого конденсатора $\pm 2\%$, погрешность измерения температуры $\pm 0{,}5^\circ$C (относительная погрешность в интервале температур 20—70°, определяемая суммой $\frac{\Delta T_1}{T_1}$ и $\frac{\Delta T_0}{T_0}$,

составляет 3—4%) и, учитывая некоторое несовпадение температуры образца и термометра, можно определить абсолютную погрешность измерения *ТКЕ*:

$$\Delta ТКЕ = \pm (0{,}1\ ТКЕ + 5 \cdot 10^{-6}).$$

Емкость измеряемого образца не должна быть менее 30 *мкмкф*.

4. Измерение реактивной мощности высокочастотных конденсаторов

Величина реактивной мощности определяется на основании измерения трех величин—напряжения U, емкости C, частоты f, и вычисляется по формуле

$$P = 2\pi f U^2 C,$$

причем напряжение U выражается в вольтах, емкость C— в фарадах, а реактивная мощность в вольтамперах.

Практически реактивную мощность определяют обычно по формуле:

$$P_{ква} = 1{,}89 \frac{U_{кв}^2 \cdot C\ мкмкф}{\lambda_м},$$

где $P_{ква}$ — реактивная мощность в *ква*,
$U_{кв}$ — напряжение в *кв*,
C — емкость в *мкмкф* и λ — длина волны в метрах.

Относительная погрешность определения величины реактивной мощности составляет:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{2\Delta U}{U} + \frac{\Delta C}{C} + \frac{\Delta f}{f}.$$

Считая, что погрешность измерения напряжения составляет $\pm 5\%$, погрешность измерения частоты $\pm 0{,}1\%$, а погрешность измерения емкости $\pm 1\%$, относительная погрешность измерения реактивной мощности:

$$\frac{\Delta P}{P} = \pm (2 \cdot 5 + 0{,}1 + 1) \simeq 11\%.$$

Погрешность измерения номинальной реактивной мощности конденсатора, устанавливаемой по температуре допустимого перегрева поверхности конденсатора, составляет $\simeq 15\%$ в связи с погрешностями измерения температур.

3. Определение механической прочности диэлектриков

Важнейшей характеристикой материалов с точки зрения механической прочности является временное сопротивление изгибу. Определение этой величины для образцов небольших

размеров (100×5 *мм* и меньше) очень несложно, в противоположность, например, испытанию на разрыв. Простая установка для испытания на изгиб показана на рис. 6.

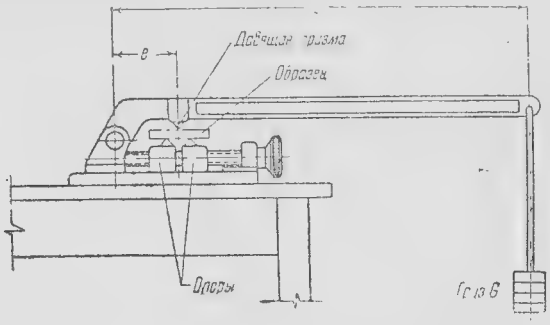


Рис. 6. Рычажный прибор для испытания материалов на механическую прочность (изгиб).

Разрушающее усилие определяется, исходя из соотношения плеч рычага и веса груза. Временное сопротивление изгибу

$$\sigma_{из} = \frac{M}{W}.$$

Изгибающий момент M равен:

$$M = \frac{Pl}{4},$$

где P — разрушающее усилие в *кг*, приложенное к образцу, равное весу груза с учетом веса рычага, умноженному на соотношение плеч рычага.

l — длина образца между опорами в *см*.

Момент сопротивления W для прямоугольного бруска

$$W = \frac{b\,h^2}{6},$$

где b — ширина образца в *см*,

h — высота образца в *см*.

Таким образом

$$\sigma_{из} = \frac{1{,}5 \cdot P \cdot l}{b\,h^2} \text{ в } кг/см^2.$$

Соотношение плеч рычага прибора, показанного на рис. 6, (1 : 6) позволяет производить испытания брусков из радиокерамики с грузом G на конце рычага, не превосходящим 12 килограммов.

ЛИТЕРАТУРА

Августиник А. И. О соответствии некоторых свойств огнеупорных силикатных систем их составам. Огнеупоры, 1947, № 4.

Александров А. П. и *Журков С. Н.* Явления хрупкого разрыва, ГТТИ, 1933.

Александров Б. И., Кобеко П. П. и *Кувшинский Е. В.* Структурные диэлектрические потери в кристаллическом и твердом аморфном состоянии. Журнал технической физики, 1936, т. IV, стр. 963.

Александров Б. И., Кобеко П. П. и *Кувшинский Е. В.* Структурные диэлектрические потери в пластифицированной глюкозе. Журнал технической физики, 1936, т. VI, стр. 131.

Андреев Н. И. Пьезоэлектрические кристаллы и их применение. Электричество, 1947, № 2.

Андрианов К. А. Грибанова О. И. и др. Новые теплостойкие диэлектрики — силиконы. Электричество, 1946, № 2.

Аппен А. О химических соединениях в стекле. Успехи химии, 1937, т. VI, стр. 662.

Белянкин Д. С. и *Филоненко Н. Б.* Влияние минирализаторов на образование синтеркорунда. Доклады Академии Наук СССР, 1935, № 2.

Блохинцев Д. И. Современные воззрения на природу диэлектриков и проводников. Сборник «Электрическая изоляция», 1938, в. 2.

Блюмберг Б. Я. Введение в физическую химию стекла. Госхимиздат, 1940.

Богородицкий Н. П. Высокочастотные диэлектрики. Связьрадиоиздат, 1938.

Богородицкий Н. П. и *Майгельдинов И. А.* Электрические свойства русской канифоли. Электричество, 1931, № 9.

Богородицкий Н. П. и *Малышев В. Н.* Диэлектрические потери в кристаллах. Журнал технической физики, 1934.

Богородицкий Н. П. и *Малышев В. Н.* Диэлектрические потери в стеклах. Журнал технической физики, 1935, т. V, в. 4.

Богородицкий Н. П. Свойства мраморов Союза, Минеральное сырье, 1931, № 7.

Богородицкий Н. П. Твердый диэлектрик с большой диэлектрической постоянной. Электричество, 1935, № 9.

Богородицкий Н. П. и *Титов Н. В.* Тиконд — твердый диэлектрик с большой диэлектрической постоянной. Журнал технической физики, 1936, т. VI, в. 5.

Богородицкий Н. П. и *Кац Л. И.* Алюминоксид — изолирующий материал для техники высоких частот. Известия Электропромышленности слабого тока, 1937, № 3.

Богородицкий Н. П. и *Фридберг И. Д.* Методы расчета рабочих напряжений высоковольтных высокочастотных изоляторов. Информационно-технический бюллетень НКЭП, 1940, № 39.

Богородицкий Н. П. и *Фридберг И. Д.* Диэлектрические потери в стеклах при высоких частотах. Журнал технической физики, 1937, № 18—19.

Богородицкий Н. П. и *Фридберг И. Д.* Диэлектрические потери в керамике при радиочастотах. Известия Академии Наук СССР, 1938, Серия физическая № 3.

Богородицкий Н. П. и *Фридберг И. Д.* К вопросу о гигроскопичности твердых диэлектриков. Журнал технической физики, 1937, т. VII, вып. 12

Богородицкий Н. П. и *Фридберг И. Д.* Радиотехнический фарфор Известия электропромышленности слабого тока.

Богородицкий Н. П. и *Фридберг И. Д.* Бессвинцовый микалекс. Сборник трудов по электрической изоляции, 1938, вып. II.

Богородицкий Н. П. и *Фридберг И. Д.* Влагостойкий микалекс. Известия электропромышленности слабого тока, 1940, № 6.

Богородицкий Н. П., Иванова А. И. и *Фридберг И. Д.* Поверхностная проводимость твердых диэлектриков. Вестник электропромышленности, 1943, № 4—5.

Богородицкий Н. П. и *Фридберг И. Д.* Конструирование и расчет высоковольтных высокочастотных конденсаторов. Электричество, 1946, № 11.

Богородицкий Н. П. Высокочастотная керамика в Германии. Технический отчет, 1945.

Born, M,. Hanbduch der Physik, Bd 2412, 1933.

Вальтер А. Ф. (ред). Физика диэлектриков. ГТТИ, 1932.

Бюссем и *Вейль.* О строении стекла. Успехи химии, 1937, т. 1, стр. 75

Волькенштейн Ф. Ф. Об электронной электропроводности в диэлектриках при сильных полях. Журнал технической физики, 1939 IX, вып. 3.

Волькенштейн Ф. Ф. Современные точки зрения на механизм электрического пробоя в твердых диэлектриках. Журнал технической физики, 1935, т. V, в. 4.

Вологдин В. П. Новый генератор повышенных и высоких частот. Электричество, 1946, № 8.

Воробьев А. А. Техника высоких напряжений. Энергоиздат, 1945

Вул Б. М. Диэлектрическая проницаемость титаната бария при низких температурах. Журнал Экспериментальной и теоретической физики, 1945, т. 15, в. 12.

Вул Б. М. и Гольдман И. М. О новой разновидности титаната бария. Доклады Академии Наук, 1948, т. IX, в. 1.

Гайлиш Е. А. К расчету антенных изоляторов. Известия электропромышленности слабого тока, 1937, № 1.

Гайлиш Е. А. О тепловом пробое твердых диэлектриков при высокой частоте. Журнал технической физики, 1937, т. VII, вып. 13.

Гассель О. Кристаллохимия, ОНТИ, 1936.

Глаголев. Кварцевое стекло.

Гольдшмидт В. М. Кристаллохимия, ОНТИ, 1937,

Гохберг Б. М. Электропроводность диэлектриков, ГТТИ, 1933.

Гохберг Б. М. Рейнов Н. М. и *Гликина М. В.* Высоковольтные конденсаторы с газовой изоляцией под давлением. Журнал технической физики, 1942, т. XII, вып. 1.

Гохберг Б. М. и *Рейнов Н. М.* Высоковольтный конденсатор переменной емкости с газовой изоляцией под давлением. Журнал технической физики, 1945, т. XV, вып. 10.

Дебай П. Полярные молекулы, ГТТИ, 1931.

Dirks, The replacement of Mica in high-frequency condaenser by ceramic materials. Wireless Engineer, July, 1944.

Зальманг Г. Физико-химические основы керамики.

Иоффе А. Ф. Полупроводники и их применения. Электричество, 1946, № 1.

Казарновский Д. М. Цирконовые малогабаритные конденсаторы. Вестник электропромышленности, 1945, № 6.

Калантаров П. Л. Теория переменных токов.

Качалов Н. Н. и *Воано В. Г.* Основы производства оптического стекла, ОНТИ, 1936.

Keller, Die dielektrischen Verluste von Cläsern, Zeitschrift fur techn. Physic, 1933, № 33.

Clark and Scoville, Capacitors for high frequency induction heating circuits, Electrical Engineering, nov 1945.

Кесених Р. М. Собственная емкость однослойных цилиндрических катушек самоиндукции. Труды Научно-исследовательского института 1947, № 3.

Кобеко П. П. Физико-технические свойства диэлектриков. ОНТИ, 1934.

Кобеко П. П. и др. Электрические свойства кварца. Известия электропромышленности слабого тока, 1936, № 8—9.

Кобеко П. П., Михайлов Г. П. и *Новикова З. И.* Диэлектрические потери в полярных полимерах. Журнал технической физики. 1944, т. XIV.

Коломиец Б. Т. Термисторы. Электричество, 1947, № 3.

Кузнецов В. Д. Физика твердого тела, 1932.

Лебедев А. А. Рентгенографические исследования структуры стекол. Известия Академии Наук СССР, 1937, № 3.

Luft, H, uberschlagspannungen bei Hochfrequenz, Archiv f, Electrotechnik, B. 31, № 2, 1937.

Littleton and Morrey, The Electrical properties of glass. 1933.

Михайлов, Электроматериаловедение, Энергоиздат, 1940.

Михайлов М. М. и *Дьяченко Т. Н.* Влагопоглощение малополярных органических электроизоляционных материалов. Электричество, 1947, № 8.

Mollet, A propos tes isolants mineraux, Le mycalex Revue generale de L'electricite, Decembre, 1933.

Müller. F., Der elektrische Durchschlog von Luft dei sehr hohen Freqenzen, Archiv fur Elektrotechnik, 6 Heft, 1934.

Нейман Л. Р. Физические основы электротехники, 1940.

Пружинина-Грановская В. И. Природа электропроводности слюды в сильных электрических полях. Журнал экспериментальной и теоретической физики, 1937, № 7.

Пружинина-Грановская В. И. Новый тип линейных объемных сопротивлений «дефар». Электричество, 1946, № 11.

Ренне В. Т. Современное конденсаторостроение. Электричество 1946, № 8.

Ренне В. Т. Электрические конденсаторы. Госэнергоиздат, 1947.

Рот А. Техника высоких напряжений.

Russell, R. Jr. and Berberich, L. V., Low—loss ceramics, Elektronics, May, 1944.

Сканави Г. И. Релаксационные диэлектрические потери в стеклах при высоких частотах. Журнал технической физики, 1939, т. IX, вып. 7.

Сканави Г. И. Диэлектрическая поляризация и потери в твердых неорганических диэлектриках. Электричество, 1947, № 8.

Смоленский Г. А. Тиглин-керамический материал с малой температурной зависимостью диэлектрической проницаемости. Журнал технической физики, 1945, т. XV, в. 3.

Смоленский Г. А. Подстроечные и переменные керамические конденсаторы, Вест. Эл. Пром., 1945, № 6.

Сосунов В. Н. Контурные катушки самоиндукции с малым температурным коэфициентом. Известия ВЭТАС, 1940.

Тареев Б. М. Стеклянная изоляция, Энергоиздат, 1943.

Тамм И. Г. Основы теории электричества, ГТТИ, 1932.

Френкель Я. И. К теории электрического пробоя в диэлектриках полупроводниках. Журнал экспериментальной и теоретической физики, 1936, № 12.

Френкель Я. И. и *Губанов.* Современное состояние теории поляризации диэлектриков. Успехи физических наук, 1940, № 4.

Waren, Ceram Soc, 1934, № 17 .

Шитиков Г. Т. Катушки самоиндукции для задающих частоту генераторов. Научно-Технический Бюллетень Института, 1946, № 5.

Шитиков Г. Т. Влияние климатических условий на нестабильность основных элементов колебательного контура лампового генератора и методы уменьшения нестабильности. Труды Научно-исследовательского института, 1947, вып. 4.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Предисловие 3

Часть I. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ

Введение 5

1. Строение вещества и электрические свойства . . 5

2 Диэлектрик в электрическом поле 8

Глава I. Диэлектрическая проницаемость

3. Понятие о диэлектрической проницаемости и емкости. 4. Поляризованный диэлектрик. 5. Предвычисление диэлектрической проницаемости. 6. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости. 7. Температурная зависимость емкости системы конденсаторов. Диэлектрическая проницаемость смесей. 8. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости . . . . 11—28

Глава II. Сквозная электропроводность диэлектриков

9. Понятие о сквозной электропроводности. 10. Природа сквозной электропроводности. 11. Зависимость электропроводности от напряжения. 12. Электропроводность технических диэлектриков . . . . . 30—38

Глава III. Диэлектрические потери

13. Общие сведения. 14. О природе диэлектрических потерь. 15. Формальная теория диэлектрических потерь. 16. О выборе эквивалентной схемы диэлектрика. 17. Расчет угла потерь системы конденсаторов. 18. Теория диэлектрических потерь при поляризации диэлектрика . . . . . 40—51

Глава IV. Тепловой пробой диэлектриков

19. Общие замечания. 20. Тепловой расчет диэлектрика в общем случае. 21. Тепловой расчет стержневого изолятора. 22. Тепловые расчеты типовых изоляторов. 23. О расчете емкости изоляторов . . . . . 57—71

Глава V. Электрический пробой твердых и жидких диэлектриков

24. О механизме электрического пробоя. 25. Экспериментальные данные по электрическому пробою . . 76—77

Глава VI. Пробой воздуха и разряд по поверхности диэлектрика

26. Общие замечания. 27. Классификация изоляторов в связи с поверхностным перекрытием . . . . . 81—86

Глава VII. Объемная гигроскопичность диэлектриков

28. О природе объемной гигроскопичности. 29. Методика определения гигроскопичности. 30. Гигроскопичность неоднородных диэлектриков. 31. Гигроскопичность однородных диэлектриков . . . . . 91—98

Стр.

Глава VIII. **Поверхностная гигроскопичность и поверхностная электропроводность твердых диэлектриков**
32. Общие замечания. 33. Классификация диэлектриков с точки зрения их поверхностной электропроводности. 34. О методике измерения поверхностной электропроводности. 35. Экспериментальные данные по поверхностной электропроводности. 36. Влияние поверхностных покрытий на поверхностное сопротивление изоляторов . . . . . 100—107

Глава IX. **Механическая прочность технических диэлектриков**
37. Общие замечания. 38. Механическая прочность технических диэлектриков. 110

ЧАСТЬ II. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА ДИЭЛЕКТРИКОВ

Введение 114

39. Структура и энергия решетки. 40. Кристаллизация и стеклообразование. 41. Классификация диэлектриков. 114—118

Глава X. **Диэлектрические потери в поликристаллических диэлектриках**
42. Общие замечания. 43. Примеси в кристаллических диэлектриках. 44. Нейтрализация примесей. . . . . 120—125

Глава XI. **Диэлектрические потери и структура неорганических стекол**
45. Представления о строении стекла. 46. Диэлектрические потери в неорганических стеклах. . . . . 126—128

ЧАСТЬ III. СВОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Введение 131

Глава XII. **Керамические диэлектрики**
47. Классификация керамических материалов согласно назначению. 48. Классификация радиокерамических материалов по роду исходного сырья и составу кристаллической фазы. 49. Радиокерамика с невысоким значением диэлектрической проницаемости. 50. Конденсаторная радиокерамика. 51. Пористая электрокерамика. 134—161

Глава XIII. **Методы изготовления керамических деталей**
52. Классификация керамических деталей по технологическим признакам. 53. Точность размеров керамических деталей. 54. Глазурование радиокерамики. 55. Схема технологического процесса изготовления керамических деталей из радиофарфора. 56. Подготовка сырьевых материалов и приготовление массы. 57. Изготовление изделий методом сухой прессовки. 58. Изготовление изделий методом протяжки массы через мундштук. 59. Изготовление изделий методом формовки пластичной массы. 60. Изготовление изделий методом пластичной прессовки (штамповки). 61. Изготовление изделий методом литья. 62. Методы механической обработки керамических заготовок. 63. Шлифовка обожженных керамических деталей. 64. Обжиг керамических изделий . . . . . 167—204

Стр.

Глава XIV. **Методы крепления металлической арматуры на керамических деталях**
65. Общие замечания. 66. Механический способ крепления. 67. Заделка металла в керамику с помощью цементов. 68. Вакуумно-плотное соединение керамики с металлом методом пайки. 69. Соединение керамики с металлом посредством стекла . . . . . 207—217

Глава XV. **Неорганические стекла**
70. Общая характеристика. 71. Физические и механические свойства стекол. 72. Электрические свойства стекол. 73. Плавленый кварц. 74. Стеклянные проходные изоляторы . . . . . 218—233

Глава XVI. **Микалекс**
75. Общая характеристика. 76. Краткая технология. 77 Свойства микалекса. 78. Нормы на механическую обработку микалекса . . . . . 235—246

Глава XVII. **Обрабатывающиеся материалы вспомогательного значения**
79. Общие замечания. 80. Мрамор. 81. Талькохлорит. 82. Асбоцемент. 83. Шифер . . . . . 247—251

Глава XVIII. **Диэлектрики—монокристаллы**
84. Слюда. 85. Кристаллический кварц . . . . . 254—263

ЧАСТЬ IV. ПРИМЕНЕНИЕ КЕРАМИКИ В ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ АППАРАТУРЕ

Введение 267

Глава XIX. **Установочные детали из радиокерамики**
86. Общие замечания. 87. Конструкции установочных изоляторов . . . . . 267—269

Глава XX. **Катушки индуктивности**
88. Общие замечания. 89. Конструкции катушек индуктивности . . . . . 279—280

Глава XXI. **Высокочастотные конденсаторы**
90. Общие замечания. 91. Конструирование и расчет мощных высокочастотных конденсаторов. 92. Низковольтные высокочастотные керамические конденсаторы 284—308

Глава XXII. **Непроволочные сопротивления**
93. Характеристики сопротивлений. 309

Приложение

Основные испытания высокочастотных диэлектриков
1. Определение угла диэлектрических потерь. 2. Погрешности измерения основных электрических характеристик. 3. Определение механической прочности диэлектриков . . . . . 312—321

36033

Корректор *М. В. Головачева* Техн. редактор *К. О. Павляк*

А-05108 26/V—48 г. Объем 20½ п. л. Зак. 1378. Тир. 5 000.

Типография изд-ва „Советское радио".

Цена — 20 руб.
Переплет — 1 руб.

Новая цена
Р. 16-80

№ 8

1 × 15 = 15